

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

О. А. Єпіфанов, Б. В. Димо, А. П. Шевцов

**ЗБІРНИК ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ
з курсу "Тепломасообмін"**

Рекомендовано Методичною радою НУК

Миколаїв 2007

УДК 536.27: 629.5

Єпіфанов О.А., Димо Б.В., Шевцов А.П. Збірник лабораторних робіт з курсу "Тепломасообмін". – Миколаїв: НУК, 2007. – 56 с.

Кафедра технічної теплофізики і суднових паровиробних установок

Наведені основні поняття, визначення й закони процесів теплоперенесення, розрахункові формули і методика обробки та узагальнення досліджуваних даних. Подані опис і методика виконання лабораторних робіт, а також необхідні довідкові матеріали.

Призначений для студентів спеціальностей 7.090509 "Суднові енергетичні установки та устаткування", 7.090510 "Теплоенергетика", 7.090506 "Турбіни", 7.090520 "Холодильні машини та установки", 7.090210 "Двигуни внутрішнього згоряння" денної і заочної форм навчання.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Б.Г. Тимошевський

© Видавництво НУК, 2007

Навчальне видання

ЄПІФАНОВ Олександр Анатолійович

ДИМО Борис Васильович

ШЕВЦОВ Анатолій Павлович

**ЗБІРНИК ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ
з курсу "Тепломасообмін"
(українською мовою)**

Редактор *Т.Б. Забабуріна*
Комп'ютерна правка та верстка *О.М. Черевата*
Коректор *М.О. Паненко*

Свідцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру
видавців, виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції
ДК № 2506 від 25.05.2006 р.

Підписано до друку 25.10.07. Папір офсетний. Формат 60×84/16.
Друк офсетний. Гарнітура "Таймс". Ум. друк. арк. 3,3. Обл.-вид. арк. 3,5.
Тираж 500 прим. Вид. № 30. Зам. № 345. Ціна договірна.

Видавець і виготівник Національний університет кораблебудування,
54002, м. Миколаїв, вул. Скороходова, 5

ПЕРЕДМОВА

Підготовка кваліфікованих інженерів-енергетиків у вищих навчальних закладах передбачає оволодіння методологічними основами експерименту в області тепломасообміну.

Збірник уміщує лабораторні роботи, передбачені робочими навчальними програмами дисциплін "Тепломасообмін" та "Теоретичні основи теплотехніки".

Крім опису лабораторних робіт і методичних вказівок щодо їх виконання у збірнику наведені короткі відомості з теорії тепломасообміну, а у додатках 1–7 – необхідний довідковий матеріал.

ЗАГАЛЬНІ ВИМОГИ ДО ПРОВЕДЕННЯ РОБІТ І ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТІВ

Для успішного проведення лабораторної роботи студент має опрацювати рекомендовану літературу, засвоїти основні поняття і розрахункові співвідношення відповідного розділу курсу й даного збірника.

Перед виконанням роботи студент повинен ознайомитися з описом лабораторної установки і схемою вимірювань, методикою дослідження й обробки досліджуваних даних, підготувати форму протоколу для їх запису. Перед вмиканням стенда студент пред'являє всі підготовлені матеріали і відповідає на питання щодо його побудови та методики дослідження. Вмикання і вимикання стенда здійснюється з дозволу та під наглядом лаборанта або викладача.

Звіт з лабораторної роботи починається титульною сторінкою, що оформлюється відповідно до загальних вимог: вказується кафедра, назва роботи, академічна група, прізвище студента і дата виконання.

Звіт виконується на стандартних аркушах формату А4 з дотриман-

ням правил ЄСКД у рукописному або друкованому вигляді. Для обробки досліджуваних даних можна використовувати комп'ютерні програми "Mathcad" та ін. Графіки виконуються на міліметрових аркушах формату А4 або А3 із вказівкою шкал на координатних осях. Шкали наносяться в масштабі з вибором початку відліку таким чином, щоб досліджувані результати займали всю площу аркуша.

Вибір теплофізичних властивостей, використання формул, запозичених з літературних джерел, мають супроводжуватися посиланнями на літературу, список якої подається вкінці звіту. Умовні літерні позначення і термінологія повинні відповідати загальноприйнятим стандартам.

1. СТАЦІОНАРНА ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ

Лабораторна робота № 1

Визначення коефіцієнта теплопровідності твердих тіл методом плоского шару

Мета роботи: вивчення одного зі стаціонарних методів визначення коефіцієнта теплопровідності теплоізоляційних матеріалів, ознайомлення з методикою експериментального вивчення процесів теплопровідності й обробки досліджуваних даних.

Короткі відомості з теорії

У теорії теплообміну тіла розглядаються як суцільні середовища, що наділені макроскопічними теплофізичними властивостями. До них відносять коефіцієнти теплопровідності λ , температуропровідності a і питому теплоємність c . Теплофізичні властивості змінюються в широких межах у залежності від природи тіла та його термодинамічних параметрів, тому експериментальні методи є практично єдиним способом їх отримання. Експериментальні методи визначення теплофізичних властивостей поділяють на стаціонарні та нестаціонарні.

Методи стаціонарної теплопровідності ґрунтуються на законі Фур'є, згідно з яким тепловий потік Q , Вт, що проходить через ізотермічну поверхню F , м², пропорційний температурному градієнту dt/dn , К/м:

$$Q = -\lambda \frac{dt}{dn} F,$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К), і диференціальному рівнянні теплопровідності, яке у випадку стаціонарного теплообміну і неза-

лежності λ від температури приймає вигляд

$$\frac{d^2 t}{dx^2} + \frac{d^2 t}{dy^2} + \frac{d^2 t}{dz^2} = 0.$$

Коефіцієнт теплопровідності λ характеризує здатність речовини проводити теплоту та залежить від температури, тиску і роду речовини.

Стосовно одновимірного температурного поля плоского, циліндричного і кульового шарів при граничних умовах першого роду коефіцієнт теплопровідності можна визначити зі співвідношення [1, 2, 4]

$$\lambda = K \frac{Q}{t_{\text{ст1}} - t_{\text{ст2}}}, \quad (1.1)$$

де Q – тепловий потік, Вт; $t_{\text{ст1}}$, $t_{\text{ст2}}$ – температури зовнішньої і внутрішньої поверхонь шару, К; K – коефіцієнт форми дослідного зразка, м^{-1} .

Коефіцієнт форми для необмеженого плоского, циліндричного та кульового шарів визначається за формулами

$$K = \frac{\delta}{F}; \quad K = \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right) \frac{1}{2\pi l}; \quad K = \left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2}\right) \frac{1}{2\pi},$$

де δ – товщина плоского шару, м; F – площа поверхні плоского шару, нормальної до напрямку теплового потоку, м^2 ; d_1 , d_2 – внутрішній і зовнішній діаметри циліндричного й кульового шарів відповідно, м; l – довжина циліндричного шару, м.

Таким чином, для того щоб визначити коефіцієнт теплопровідності досліджуваного матеріалу λ , необхідно виміряти у стаціонарному режимі тепловий потік Q , що проходить крізь дослідний зразок, і температури його ізотермічних поверхонь. За рівнянням (1.1) розраховують коефіцієнт теплопровідності твердих тіл, а також рідин і газів при відсутності інших видів перенесення теплоти. У випадку залежності λ від температури рівнянням (1.1) можна користуватися за умови, що у дослідному зразку має місце незначний перепад температур. У цьому випадку отримані середні значення коефіцієнта теплопровідності будуть близькими до їх істинних значень.

При дослідженні теплоізоляційних матеріалів, що мають низьку теплопровідність ($\lambda \leq 2,3 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$), широкого розповсюдження набув метод необмеженого плоского шару, коли зразку досліджуваного матеріалу надається форма тонкої круглої або квадратної пластинки. Для створення перепаду температур одна поверхня пластинки нагрівається,

а інша охолоджується за допомогою пристроїв, що мають плоскі поверхні, між якими затискається дослідний зразок. При виборі геометричних розмірів дослідних зразків необхідно виконати умову $\delta \leq (1/7 \dots 1/10)D$, де D – діаметр круглої пластини (або сторона квадрата), для забезпечення одновимірності температурного поля. Для усунення теплових втрат з бокових поверхонь зразка використовують теплову ізоляцію або охоронні електричні нагрівники.

До недоліків методу слід віднести труднощі, пов'язані з усуненням термічного опору, що виникає у місцях контакту зразка з поверхнями нагрівника і холодильника. З метою зменшення контактного термічного опору поверхні піддають старанній обробці, а для забезпечення контакту створюють значні стискаючі зусилля.

Поряд з описаним методом на практиці розповсюдження набули методи необмеженого циліндричного шару, коли зразку надається форма труби, і кульового шару, коли зразку надається форма кульової стінки. Перший метод використовується при дослідженні теплопровідності рідин і газів, а другий – сипких матеріалів [3, 5, 6].

Опис експериментальної установки

З метою створення одновимірного температурного поля дослідним зразкам *1* надають форму двох плоских дисків, які розміщують між нагрівником *2* і холодильниками *4* (рис. 1.1). Вони мають щільно прилягати до гарячої та холодної поверхонь приладу без повітряних зазорів. Щільність контакту всіх елементів приладу досягається необхідною чистою обробки стичних поверхонь, спеціальним графітовим мащенням і натискним пристроєм.

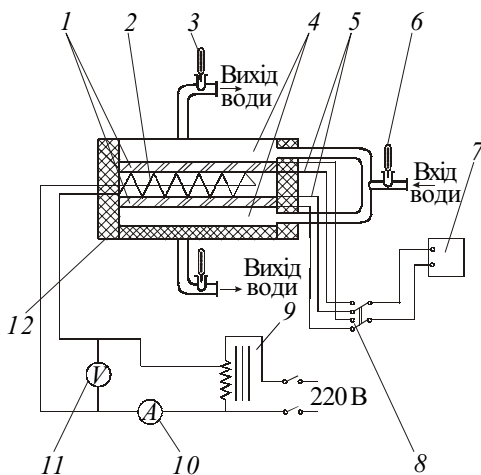


Рис. 1.1. Схема експериментальної установки для визначення коефіцієнта теплопровідності методом плоского шару:

- 1 – дослідні зразки; 2 – електронагрівник; 3, 6 – термометри;
- 4 – холодильники; 5 – термопари;
- 7 – цифровий мілівольтметр;
- 8 – перемикач термо-пар; 9 – автотрансформатор; 10 – амперметр;
- 11 – вольтметр; 12 – ізоляція

Нагрівання здійснюється електричним нагрівником, виконаним з ніхромового дроту діаметром $0,4 \cdot 10^{-3}$ м у фарфорових бусинах, що розміщується у спеціальному каркасі. Для запобігання радіальним витокам теплоти застосовується бокова теплова ізоляція 12 з пінопласту.

При стаціонарному тепловому стані тепловий потік, що виділяється нагрівником, повністю проходить через дослідні зразки. Цей тепловий потік визначається за електричною потужністю нагрівника, яка вимірюється за показаннями амперметра 10 і вольтметра 11. Відведення теплоти, що пройшла крізь зразки, здійснюється водою, що протікає через порожнину двох холодильників 4.

Температура поверхонь дослідних зразків вимірюється термопарами 5. Одновимірний характер температурного поля дозволяє робити вимірювання температури тільки в одній точці поверхні – у центрі диска. Термопари кожного зразка з'єднані між собою диференціально та вимірюють різницю температур його гарячої й холодної поверхонь. Електро-рушійна сила (ЕРС) термопар вимірюється цифровим мілівольтметром 7. Термопари підключаються до мілівольтметра за допомогою перемикача термопар 8. Температура охолодної води на вході й виході з холодильника вимірюється термометрами 6 і 3. Потужність нагрівника змінюється за допомогою автотрансформатора 9.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з експериментальною установкою, конструкцією і правилами користування приладами.

2. Перевірити наявність води, що охолоджує холодильник.

3. Включити електроживлення нагрівника й установити за допомогою автотрансформатора перше значення потужності нагрівника.

4. Після досягнення зразками стаціонарного теплового стану виміряти силу струму I , напругу U , ЕРС термопар (ΔE_1 і ΔE_2), температуру охолодної води на вході й виході з холодильника $t_{\text{вх}}$ і $t_{\text{вих}}$ та занести їх до протоколу. Для визначення виходу установки на стаціонарний режим необхідно через кожні 3 хв виконувати вимірювання різниці температур на поверхнях одного із зразків. Режим вважається стаціонарним, якщо протягом трьох послідовно виконаних вимірювань показання мілівольтметра залишаються незмінними.

5. Перейти до наступного режиму шляхом зміни потужності нагрівника. Контроль виходу установки на новий стаціонарний режим робиться аналогічно.

Протокол експериментальних даних

Роботу виконав студент _____ групи № ____

Розміри дослідного зразка: діаметр $d =$ __ м; товщина δ __ м

Номер режиму	I, A	U, B	ΔE_1	ΔE_2	$t_{вх}$	$t_{вих}$
			мВ		°C	
1						
2						
3						

Викладач _____ (підпис)

Методика обробки експериментальних даних

1. Визначається тепловий потік через дослідні зразки, Вт,

$$Q = IU,$$

де I – сила струму, А; U – напруга, В.

2. Розраховується площа поверхні зразка (диска), м²,

$$F = 0,25\pi d^2,$$

де d – діаметр диска, м, який указаний на стенді.

3. Визначається густина теплового потоку, Вт/м²,

$$q = \frac{Q}{2F}.$$

4. Визначається за показаннями термометрів 3 і 6 середня температура води в холодильнику, значення якої приймається за температурою поверхні холодильника, °C,

$$t_x = 0,5(t_{вих} + t_{вх}).$$

5. З табл. 1Д* визначається ЕРС E_x термопар, в якій один спай знаходиться при t_x , а другий – при 0 °C.

6. Розраховується середнє значення з показань диференціальних термопар, мВ,

$$E_{сер} = 0,5(\Delta E_1 + \Delta E_2).$$

7. Визначається ЕРС E_r термопар, в якій один спай знаходиться

* Таблиці з індексом "Д" подані в додатках.

при температурі поверхні нагрівника t_r , а другий – при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, мВ,

$$E_r = E_{\text{сер}} + E_x.$$

8. З табл. 1Д визначається середня температура поверхні нагрівника – t_r , $^{\circ}\text{C}$.

9. Розраховується середня різниця температур, $^{\circ}\text{C}$,

$$\Delta t_{\text{сер}} = t_r - t_x.$$

10. Визначається коефіцієнт теплопровідності матеріалу, Вт/(м·К), який відноситься до середньої температури зразків,

$$\lambda_{\text{сер}} = \frac{q\delta}{\Delta t_{\text{сер}}},$$

де δ – товщина диска, м, яка вказана на стенді.

11. Будується графік залежності $\lambda_{\text{сер}} = f(t_{\text{сер}})$ (рис. 1.2), де середня температура зразків $t_{\text{сер}} = 0,5(t_r + t_x)$. Отримані дані апроксимуються прямою лінією, за розташуванням якої розраховується рівняння $\lambda_{\text{сер}} = \lambda_0 + bt_{\text{сер}}$.

Для розрахунку коефіцієнтів λ_0 і b необхідно на прямій лінії вибрати точки 1 і 2, визначити їх координати та скласти систему:

$$\begin{cases} \lambda_{\text{сер}1} = \lambda_0 + bt_{\text{сер}1}; \\ \lambda_{\text{сер}2} = \lambda_0 + bt_{\text{сер}2}. \end{cases}$$

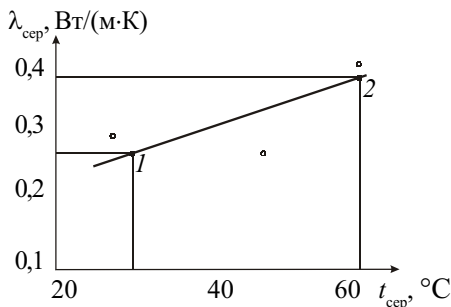


Рис. 1.2. Графік залежності $\lambda_{\text{сер}} = f(t_{\text{сер}})$ дослідного зразка

Звіт по роботі

1. Короткі відомості з теорії стаціонарної теплопровідності.
2. Принципова схема установки із зазначенням її елементів.
3. Протокол досліджуваних даних.
4. Розрахунки з обробки результатів досліду.
5. Графік залежності $\lambda_{\text{сер}} = f(t_{\text{сер}})$.
6. Аналітична залежність $\lambda_{\text{сер}} = f(t_{\text{сер}})$ і зіставлення отриманих результатів з довідковими даними [1, 2, 4].
7. Висновки.

Контрольні питання

1. Який механізм теплопровідності в різних середовищах?
2. Який фізичний зміст коефіцієнта теплопровідності?
3. Як залежить коефіцієнт теплопровідності від температури?
4. Порівняти за числовим значенням коефіцієнта теплопровідності здатність різних тіл проводити теплоту.
5. Які стаціонарні методи використовують для визначення коефіцієнта теплопровідності?
6. Чим можна пояснити знак "мінус" у правій частині рівняння Фур'є?

2. НЕСТАЦІОНАРНА ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ

Лабораторна робота № 2

Визначення коефіцієнтів температуропровідності, теплопровідності та тепловіддачі методом регулярного режиму

Мета роботи: вивчення нестационарних процесів теплопровідності і методики експериментального визначення коефіцієнтів температуропровідності, теплопровідності та тепловіддачі методом регулярного теплового режиму.

Короткі відомості з теорії

Методи нестационарної теплопровідності базуються на розв'язаннях диференціального рівняння теплопровідності

$$\frac{dt}{d\tau} = a \left(\frac{d^2 t}{dx^2} + \frac{d^2 t}{dy^2} + \frac{d^2 t}{dz^2} \right), \quad (2.1)$$

отриманих для тіл простої геометричної форми та визначених граничних умов, де $a = \lambda / (\rho c)$ – коефіцієнт температуропровідності, м²/с, що є мірою теплоінерційних властивостей тіла і характеризує швидкість вирівнювання температури середовища при нестационарних процесах.

Метод регулярного режиму першого роду впливає з аналізу розв'язання диференціального рівняння нестационарної теплопровідності (2.1) відносно температури при граничних умовах третього роду

$$-\lambda \left(\frac{dt}{dn} \right)_{\text{ст}} = \alpha (t_{\text{ст}} - t_{\text{рід}}) \quad (2.2)$$

і дотриманні сталості коефіцієнта тепловіддачі α й температури навколишнього середовища $t_{\text{рід}}$.

У цьому випадку зміна безрозмірної температури Θ у часі для будь-якої точки тіла, що має форму необмеженої пластини, циліндра або кулі, виражається нескінченним рядом

$$\Theta = \frac{\vartheta}{\vartheta_0} = \frac{t - t_{\text{рід}}}{t_0 - t_{\text{рід}}} = \sum_{i=1}^{i=\infty} A_i U_i e^{-\mu_i^2 \text{Fo}}, \quad (2.3)$$

де t_0 – початкова температура тіла, $^{\circ}\text{C}$; A_i – сталі, які визначаються з початкових умов; U_i – функції координат; μ_i – сталі, які визначаються з граничних умов; Fo – критерій Фур'є, який характеризує безрозмірний час; критерій $\text{Fo} = a\tau/l^2$ (l – характерний розмір тіла) отримують приведенням (2.1) до безрозмірного вигляду [2].

У початковий момент часу на температурне поле впливають усі члени ряду (2.3). Це перший період охолодження (нагрівання), який називають невідповідною стадією (перша стадія на рис. 2.1). На цій стадії розподіл температури у тілі головним чином визначається його початковим тепловим станом.

Однак по закінченню деякого моменту часу, що визначається числом $\text{Fo} \geq 0,25$, усі члени ряду (2.3) стають малими у порівнянні з першим і розподіл температур у часі описується тільки першим членом ряду за експоненціальним законом

$$\vartheta = \vartheta_0 A_1 U_1 e^{-\mu_1^2 \text{Fo}} = C e^{-m\tau}, \quad (2.4)$$

де $C = \vartheta_0 A_1 U_1 = \text{const}$, а стала m називається темпом охолодження тіла і вимірюється у с^{-1} :

$$m = \frac{a\mu_1^2}{l^2}. \quad (2.5)$$

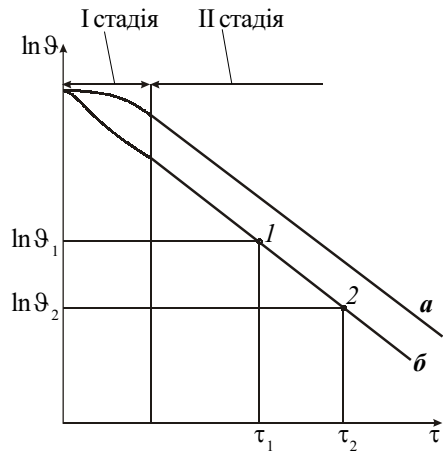


Рис. 2.1. Зміна натурального логарифма надлишкової температури тіла у часі при охолодженні і регулярному режимі першого роду:
а – внутрішня точка; б – зовнішня точка

Це друга стадія охолодження (див. рис. 2.1), при якій розподіл температури не залежить від початкового теплового стану тіла, а визначається його фізичними властивостями, геометричною формою і розмірами, а також умовами теплообміну з навколишнім середовищем. Таку стадію називають регулярним режимом. З рівняння (2.4) випливає, що при регулярному режимі натуральний логарифм надлишкової температури ϑ у будь-якій точці тіла змінюється у часі за лінійним законом

$$\ln \vartheta = -m\tau + \text{const.} \quad (2.6)$$

Темп охолодження залишається постійним на ділянці регулярного режиму (не залежить від координат та часу) і може бути визначений як тангенс кута нахилу прямої (див. рис. 2.1):

$$m = \frac{\ln \vartheta_1 - \ln \vartheta_2}{\tau_2 - \tau_1}. \quad (2.7)$$

Розрахункові точки 1 і 2 беруться на лінійній ділянці графіка в області регулярного режиму.

Після диференціювання рівняння (2.6) у часі отримаємо

$$m = -\frac{1}{\vartheta} \frac{d\vartheta}{d\tau},$$

тобто темп охолодження характеризує відносну швидкість зміни надлишкової температури у часі.

Темп охолодження залежить від фізичних властивостей тіла, його геометричної форми і розмірів, а також від умов теплообміну на поверхні тіла. Ця залежність може бути знайдена з рівняння теплового балансу

$$\rho c V \frac{\partial \bar{\vartheta}_V}{\partial \tau} d\tau = \bar{\alpha} F \bar{\vartheta}_F d\tau, \quad (2.8)$$

де $\bar{\vartheta}_V$ – середня за об'ємом тіла надлишкова температура, °C; $\bar{\vartheta}_F$ – середня надлишкова температура поверхні тіла у даний момент часу, °C; ρ – густина тіла, кг/м³; c – питома теплоємність тіла, Дж/(кг·K); V – об'єм тіла, м³; $\bar{\alpha}$ – середній у процесі охолодження (нагрівання) коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·K); F – площа поверхні тіла, м²; τ – час, с.

Якщо розділити рівняння (2.8) на $\bar{\vartheta}_V$, а відношення $\bar{\vartheta}_F / \bar{\vartheta}_V$ позна-

чити ψ , отримаємо

$$m = \psi \frac{\bar{\alpha} F}{\rho c V}, \quad (2.9)$$

де ψ – коефіцієнт нерівномірності температурного поля.

З (2.9) випливає, що темп охолодження пропорційний коефіцієнту тепловіддачі, площі поверхні тіла та обернено пропорційний повній теплоємності тіла $\rho c V$ (перша теорема Г.М. Кондратьєва).

Значення коефіцієнта ψ лежить у межах $0 \leq \psi \leq 1$ і визначається умовами охолодження на поверхні тіла. Визначення цього коефіцієнта у ряді випадків викликає труднощі, тому при постановці експерименту намагаються забезпечити умови, при яких $\psi = 1$. Ці умови мають місце, коли термічний опір тіла l/λ малий у порівнянні з термічним опором тепловіддачі $1/\alpha$. У цьому випадку весь термічний перепад зосереджений у примежовому шарі рідини, що оточує тіло, а температура тіла вирівнюється, тобто $\bar{\vartheta}_F = \bar{\vartheta}_V$ і $\psi = 1$. Відношення зазначених термічних опорів характеризується критерієм Біо (критерій Біо отримують приведенням (2.2) до безрозмірного вигляду):

$$Bi = \frac{\alpha l}{\lambda} = \frac{l/\lambda}{1/\alpha},$$

а тому умови, при яких $\psi = 1$, здійснюються при $Bi \rightarrow 0$ (практично при $Bi \leq 0,1$). Ці умови відповідають зовнішній задачі, коли процес охолодження і нагрівання тіла визначається інтенсивністю тепловіддачі на поверхні. При цьому процес вирівнювання температури у тілі відбувається значно інтенсивніше, ніж відведення теплоти з поверхні (рис. 2.2,а). Таким чином, при $Bi \rightarrow 0$ у відповідності до (2.9) темп охолодження пропорційний коефіцієнту тепловіддачі:

$$m = B\alpha, \quad (2.10)$$

де $B = F/(\rho c V)$ – сталий коефіцієнт, який залежить від матеріалу і форми тіла. Залежність темпу охолодження від коефіцієнта тепловіддачі має асимптотичний характер, бо зі зростанням значення α зростає і критерій Біо, що у свою чергу призводить до зменшення ψ . У граничному випадку при $\alpha \rightarrow \infty$, $\psi \rightarrow 0$ і m наближається до кінцевої величини m_∞ (рис. 2.3).

Регулярний режим дозволяє визначати теплофізичні властивості речовин. Зокрема, він широко використовується для визначення коефіцієнта температуропровідності a , який у відповідності до рівняння (2.5) при $Bi \rightarrow \infty$ ($\mu_1 = \text{const}$) пропорційний темпу охолодження m_∞ (друга

теорема Г.М. Кондратьєва):

$$a = Km_{\infty}. \quad (2.11)$$

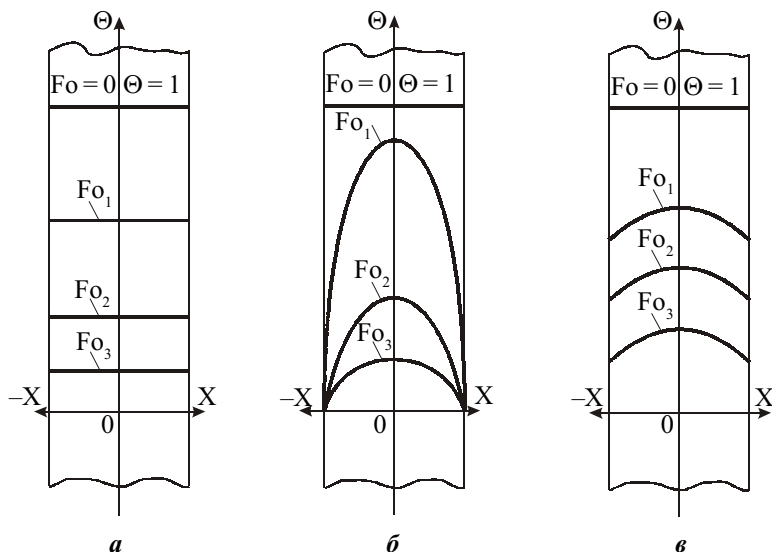


Рис. 2.2. Розподіл температури у плоскій стінці при її охолодженні в умовах:

a – $Bi \rightarrow 0$; *б* – $Bi \rightarrow \infty$; *в* – $0,1 \leq Bi \leq 100$; $Fo_1 < Fo_2 < Fo_3$

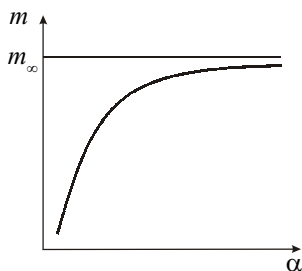


Рис. 2.3. Залежність темпу охолодження від коефіцієнта теплообміну

Коефіцієнт K , m^2 , залежить від форми і розмірів тіла та може бути обчислений для тіл простої форми. Так, наприклад, для кулі радіусом R коефіцієнт $K = (R/\pi)^2$.

Умова $Bi \rightarrow \infty$ (практично $Bi > 100$) відповідає внутрішній задачі, коли процес охолодження визначається тільки розмірами тіла і його фізичними властивостями. Внаслідок великої інтенсивності теплообміну температура на поверхні тіла приймає постійне значення,

що дорівнює температурі оточуючого середовища (див. рис. 2.2,б).

На практиці неможливо виконати умову $\alpha \rightarrow \infty$ і визначити m_{∞} . Однак у силу асимптотичного характеру зміни $m = f(\alpha)$ (див. рис. 2.3) можна оцінити точність експериментального визначення величини m_{∞} .

при кінцевих значеннях α . Якщо задовольнитися точністю 3,5 %, необхідно забезпечити умови проведення експерименту, при яких $\alpha \geq 20 \lambda V / (KF)$ [3].

У випадку, якщо $0,1 \leq Bi \leq 100$, температурні криві у будь-який момент часу мають вигляд, як показано на рис. 2.2,в. У цьому випадку інтенсивність процесу охолодження (нагрівання) визначається як внутрішнім, так і зовнішнім термічним опором.

Залежність (2.10) також дозволяє використати закономірності регулярного режиму першого роду для експериментального визначення коефіцієнтів тепловіддачі [3, 5, 6].

До недоліків методу регулярного режиму слід віднести труднощі реалізації граничних умов, прийнятих у теорії.

Опис експериментальної установки

Зразок досліджуваного матеріалу, обладнаний термопарою, називається акалориметром. Застосовуються акалориметри кульової, циліндричної та призматичної форми. У даній роботі встановлений акалориметр кульової форми 1, виготовлений з вуглецевої сталі, діаметром 60 мм. На держаку він закріплений за допомогою спеціальних штифтів. Електронагрівник 2 розташований у циліндричному корпусі та може при необхідності відводитися від акалориметра (рис. 2.4).

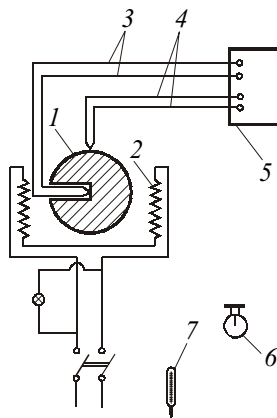


Рис. 2.4. Схема експериментальної установки для визначення коефіцієнтів теплопровідності, теплопровідності й тепловіддачі методом регулярного теплового режиму:

- 1 – дослідний зразок; 2 – електронагрівник;
- 3, 4 – термопари; 5 – цифровий мілівольтметр;
- 6 – секундомір; 7 – ртутний термометр

На поверхні акалориметра встановлена термопара 4, а всередині – друга термопара 3. Обидві термопари хромель-копелеві. Температура оточуючого повітря контролюється термометром 7. Вимірюється ЕРС термопар за допомогою цифрового мілівольтметра 5 із цифровою індикацією температури і самокомпенсацією температури холодних спайв. Моменти вимірювань температури визначаються секундоміром 6.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з описом установки та переконатися в правильності складання і готовності її до дії.

2. Включити електронагрівник.

3. Нагріти акалориметр до 170...180 °С.

4. Виключити і відвести електронагрівник від акалориметра.

5. Включити секундомір і записати температуру однієї з термопар (наприклад, усередині акалориметра).

6. Через 60 с записати температуру на поверхні акалориметра. Через кожні 60 с по черзі записувати температури відповідної термопари, вимірювання проводити до температури 70...80 °С, тому що подальша зміна температури відбувається дуже повільно.

Результати вимірювань занести до протоколу.

Протокол експериментальних даних

Роботу виконав студент _____ групи № ____

$D_{\text{кулі}} = 60 \text{ мм}$; $\rho = \text{_____ кг/м}^3$; $c = \text{_____ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$

Температура навколишнього середовища $t_{\text{рід}} = \text{_____ } ^\circ\text{C}$

Номер вимірювань	Час вимірювань, с	Температура всередині акалориметра $t_{\text{вс}}$	Температура на поверхні акалориметра $t_{\text{пов}}$
		°C	
1	0	*	—
2	60	—	*
3	120	*	—
...
21	1200	*	—

Примітка. При проведенні дослідів результати вимірювань записувати у протоколі на місця, позначені зірочкою (*).

Викладач _____ (підпис)

Методика обробки експериментальних даних

1. За експериментальними даними будується графік $\ln \vartheta = f(\tau)$ для зовнішньої або внутрішньої термопар та на лінійній ділянці графіка в області регулярного режиму беруться розрахункові точки 1 і 2 (див. рис. 2.1).

2. Визначається за формулою (2.7) темп охолодження.

3. Визначається коефіцієнт температуропровідності, м²/с,

$$a = \frac{R^2}{(\pi/\chi)^2} m,$$

де R – радіус кулі, м; χ – коефіцієнт, що залежить від характеристик середовища, в якому охолоджується тіло (для повітря $\chi = 16$).

4. Визначається коефіцієнт теплопровідності $\lambda = \alpha \rho c$, Вт/(м·К), і порівнюється зі значенням λ для вуглецевої сталі [1, 2, 4].

5. За досліджуваними даними будується графік залежності температури зразка від часу $t = f(\tau)$. Для цього температури всередині $t_{\text{вс}}$ і на поверхні $t_{\text{пов}}$ акалориметра (див. протокол експериментальних даних) усереднюються плавною кривою, що дає наочне уявлення про характер зміни температури кулі при охолодженні (рис. 2.5).

6. На кривій вибираються точки 1 і 2 та визначається кількість теплоти, що віддається у процесі охолодження на ділянці 1–2, Дж,

$$Q = \rho c V (t_1 - t_2),$$

де $V = 4\pi R^3/3$ – об'єм кулі, м³; t_1 і t_2 – відповідно температури у точках 1 і 2 кривої, °С, які знімають із графіка.

7. Розраховується кількість теплоти $Q_{\text{вип}}$, Дж, що віддається

кулею випромінюванням за той же період. Для визначення $Q_{\text{вип}}$ ділянка 1–2 (див. рис. 2.5) розбивається на декілька рівних частин (наприклад, на 10) і розрахунок проводиться у табличній формі.

8. У процесі охолодження на ділянці 1–2 визначається середній коефіцієнт конвективної тепловіддачі, Вт/(м²·К),

$$\bar{\alpha} = \frac{Q - Q_{\text{вип}}}{F \Delta \bar{t} (\tau_2 - \tau_1)},$$

де Δt – середня різниця температур у процесі охолодження, °С,

$$\Delta t = (t_1 - t_2) / \ln \left(\frac{t_1 - t_{\text{рід}}}{t_2 - t_{\text{рід}}} \right);$$

$F = 4\pi R^2$ – площа поверхні кулі, м².

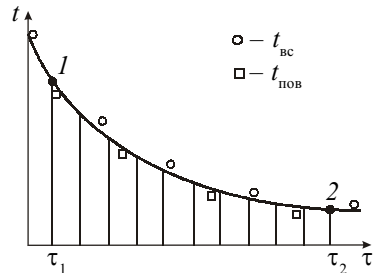


Рис. 2.5. Графік залежності температури дослідного зразка від часу

∞
 Розрахунок кількості теплоти $Q_{\text{вип}}$, що віддається кулею випромінюванням під час охолодження

Номер ділянки	Абсолютна температура, К		$\left(\frac{T}{100}\right)^4_{\text{ср } i} = 0,5 \left[\left(\frac{T_{1i}}{100}\right)^4 + \left(\frac{T_{2i}}{100}\right)^4 \right]$	Теплота, яка віддається випромінюванням на ділянці $\Delta\tau_i$, Дж
	на початку ділянки $T_{1i} = t_{1i} + 273$	на кінці ділянки $T_{2i} = t_{2i} + 273$		
	2	3	4	
1				
1				
2				
...				
10				
				$Q_{\text{вип } i} = 5,67\varepsilon F \Delta\tau_i \left[\left(\frac{T}{100}\right)^4_{\text{ср } i} - \left(\frac{t_{\text{рід}} + 273}{100}\right)^4 \right]$
				$Q_{\text{вип}} = \sum Q_{\text{вип } i}$

Примітки. Ступінь чорноти кулі $\varepsilon = 0,8$; довжина i -ї частини $\Delta\tau_i = \tau_2 - \tau_1 / 10$ с.

Звіт по роботі

1. Короткі відомості з теорії нестационарної теплопровідності.
2. Принципова схема установки із зазначенням її елементів.
3. Протокол вимірювань.
4. Графіки залежностей $\ln \vartheta = f(\tau)$ і $t = f(\tau)$.
5. Обробка результатів вимірювань.
6. Зіставлення отриманих результатів із довідковими даними.
7. Висновки.

Контрольні питання

1. Що таке нестационарний процес теплопровідності?
2. Як записується у загальному вигляді безрозмірне рівняння для нестационарного температурного поля?
3. Які критерії визначають подібність температурних полів при нестационарній теплопровідності?
4. Який режим називається регулярним? Як описується розподіл температур у часі при регулярному режимі?
5. Що характеризує темп охолодження, від чого він залежить і як визначається?
6. Який вигляд має температурне поле при $Bi \rightarrow 0$ і $Bi \rightarrow \infty$?
7. Які властивості тіл характеризують коефіцієнти теплопровідності і теплопровідності та від чого вони залежать?

3. КОНВЕКТИВНИЙ ТЕПЛООБМІН

Лабораторна робота № 3.1

Вивчення тепловіддачі вертикальної пластини до вільного потоку повітря

Мета роботи: вивчення основних закономірностей теплообміну при природному конвективному русі повітря, ознайомлення з методикою дослідження процесів тепловіддачі.

У роботі визначаються місцеві та середні значення коефіцієнтів тепловіддачі на досліджуваній поверхні й установлюється вплив на тепловіддачу протяжності поверхні та температурного напору. Досліджувані дані оброблюються в узагальненому вигляді й порівнюються з існуючими розрахунковими формулами.

Короткі відомості з теорії

Під конвекцією розуміють процеси перенесення теплоти при переміщенні об'ємів рідини або газу в просторі. Конвекція завжди супрово-

джується теплопровідністю, і цей спільний процес називають конвективним теплообміном. Конвективний теплообмін між поверхнею твердого тіла і рідиною або газом називають тепловіддачею.

За природою виникнення розрізняють два види руху – вільний та вимушений. Вільним називають рух, який відбувається внаслідок різниці густин нагрітих і холодних частин рідини у гравітаційному полі, тобто за рахунок архімедових сил. Виникнення й інтенсивність вільного руху визначається тепловими умовами процесу і залежить від роду рідини, різниці температур, напруженості гравітаційного поля та об'єму простору, в якому відбувається процес – необмежений або обмежений (наприклад, прошарки). Вільний рух називають також природною конвекцією. Рух, що виникає під дією сторонніх збудників, наприклад: насоса, вентилятора тощо, називають вимушеним, або вимушеною конвекцією. У загальному випадку вимушений рух може супроводжуватися вільним.

Згідно із законом Ньютона–Ріхмана тепловий потік, Вт, у процесі конвективного теплообміну пропорційний площі поверхні теплообміну F та різниці температур поверхні $t_{\text{ст}}$ і рідини $t_{\text{р}}$:

$$Q = \alpha F(t_{\text{ст}} - t_{\text{р}}). \quad (3.1)$$

Коефіцієнт пропорційності α у рівнянні (3.1) називають коефіцієнтом тепловіддачі, Вт/(м²·К). Він характеризує інтенсивність конвективного теплообміну. Числове значення α дорівнює тепловому потоку від однічної поверхні теплообміну при різниці температур поверхні та рідини в 1 К. У загальному випадку коефіцієнт тепловіддачі залежить від багатьох факторів: форми і розмірів тіла, режиму руху, швидкості й температури рідини, її фізичних параметрів, перепаду температури у потоці рідини, природи виникнення руху.

При вільному русі рідини її температура t у примежовому шарі змінюється від $t_{\text{ст}}$ до $t_{\text{р}}$, а швидкість w – від нуля біля стінки проходить через максимум і на великій відстані від стінки знову дорівнює нулю (рис. 3.1).

Товщина нагрітого шару спочатку мала, і течія рідини носить струменистий, ламінарний характер (рис. 3.2,*а*). За напрямком руху товщина шару збільшується й течія рідини стає нестійкою, хвилеподібною (перехідна область, див. рис. 3.2,*б*) і потім переходить у невпорядковано-вихрову, турбулентну (*в*), з відривом вихорів від стінки. Зі зміною характеру руху змінюється і тепловіддача. При ламінарному русі внаслідок збільшення товщини примежового шару коефіцієнт тепловіддачі за на-

прямом руху зменшується, а при турбулентному – різко зростає і потім по висоті залишається незмінним, бо разом зі зростанням товщини при-
межового шару збільшується інтенсивність турбулентного перенесення (див. рис. 3.2). Описана картина руху рідини вздовж вертикальної стінки характерна також і для горизонтальних труб.

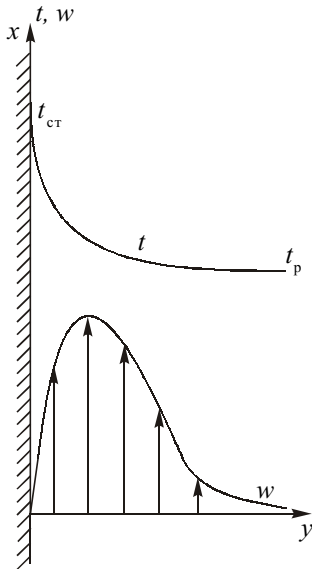


Рис. 3.1. Зміна температури t і швидкості w при вільному русі середовища вздовж нагрітої вертикальної стінки

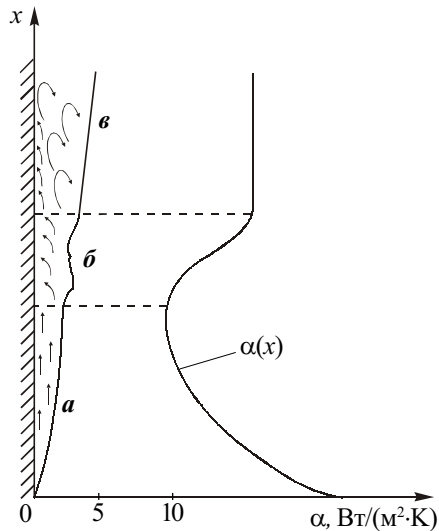


Рис. 3.2. Характер руху та зміна коефіцієнта тепловіддачі по висоті поверхні при вільному русі середовища

Основним способом розповсюдження теплоти при ламінарному русі є теплопровідність. При турбулентному режимі спостерігається сильне перемішування рідини, яке визначається усередненою швидкістю. Інтенсивність розповсюдження теплоти визначається головним чином цією швидкістю. Істотний вплив теплопровідності зберігається лише біля поверхні тіла, де переважають сили в'язкості.

Коефіцієнт тепловіддачі є основною величиною, яка підлягає експериментальному дослідженню у процесах конвективного теплообміну. Для дослідження коефіцієнта тепловіддачі використовують методи стаціонарного теплового потоку і регулярного теплового режиму (див. лабораторну роботу № 2). У методі стаціонарного теплового потоку використовують закон Ньютона–Ріхмана (див. (3.1)).

Необхідно зауважити, що вираз (3.1) справедливий лише для диференціально малої ділянки поверхні, тобто

$$dQ_x = \alpha_x (t_{\text{ст}} - t_p)_x dF, \quad (3.2)$$

оскільки коефіцієнт тепловіддачі може змінюватися по поверхні теплообміну. Індекс x указує на місцеве значення всіх величин. У цьому випадку розрізняють місцевий (локальний) коефіцієнт тепловіддачі α_x , який відповідає елементарній ділянці поверхні, та середній по поверхні коефіцієнт тепловіддачі $\bar{\alpha}$.

Із (3.2) значення місцевого коефіцієнта тепловіддачі

$$\alpha_x = \frac{q_x}{\Delta t_x}, \quad (3.3)$$

де q_x – місцева густина теплового потоку, Вт/м²; Δt_x – місцева різниця температур (температурний напір).

Середній коефіцієнт тепловіддачі може визначатися двома різними способами. Більш обґрунтоване (дозволяє розрахувати тепловий потік) визначення середнього коефіцієнта тепловіддачі за рівнянням Ньютона–Ріхмана:

$$\bar{\alpha} = \frac{\frac{1}{F} \int_F q_x dF}{\frac{1}{F} \int_F \Delta t_x dF} = \frac{\bar{q}_k}{\bar{\Delta t}}, \quad (3.4)$$

де \bar{q}_k – середня густина конвективного теплового потоку на поверхні;

$\bar{\Delta t}$ – середній температурний напір.

Також середній коефіцієнт тепловіддачі визначається як середньо-інтегральна величина всього поля місцевих значень для даної поверхні:

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{F} \int_F \alpha_x dF. \quad (3.5)$$

За рівняннями (3.3)–(3.5) розраховуються коефіцієнти тепловіддачі при проведенні дослідів.

При вивченні процесів конвективного теплообміну опрацювання досліджуваних даних робиться відповідно до теорії подібності – вчення про подібні явища. Ця теорія дозволяє виразити коефіцієнт тепловіддачі у формі залежностей – критеріальних рівнянь (рівнянь подібності), які

складаються з критеріїв подібності та мають узагальнений характер, тобто можуть бути використані для цілої групи подібних явищ.

Критерії подібності (числа подібності) – це безрозмірні комплекси фізичних величин, які є новими узагальненими змінними замість розмірних величин і відображають спільний вплив сукупності фізичних величин на явище. Використання узагальнених змінних дозволяє зменшити кількість необхідних експериментів, спростити обробку їх результатів, а також узагальнити дані експерименту.

Структура безрозмірних комплексів – критеріїв – може бути знайдена або на основі аналізу диференціальних рівнянь, що описують явище й містять загальні зв'язки між величинами (метод теорії подібності), або на основі аналізу розмірностей фізичних величин (метод аналізу розмірностей). За фізичним змістом критерії подібності виражають співвідношення між фізичними ефектами (силами, тепловими потоками), які суттєві для явища.

Критерії подібності, що складаються з фізичних величин, заданих умовами однозначності, називають визначальними, а критерії, що містять невідомі величини – визначуваними. До основних визначальних критеріїв подібності теорії теплообміну відносять критерії Рейнольдса $Re = wl/v$,

Прандтля $Pr = \nu/a$, Грасгофа $Gr = gl^3\beta\Delta t/\nu^2$. Визначуваним є критерій

Нуссельта $Nu = \alpha l/\lambda$, який включає в себе коефіцієнт тепловіддачі α (місцевий або середній). Тут w – швидкість середовища, м/с; l – визначальний розмір, м; ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості, м²/с; g – прискорення вільного падіння, м/с²; β – температурний коефіцієнт об'ємного розширення, К⁻¹; $\Delta t = t_{ct} - t_p$ – температурний напір між стінкою та рідиною, К; a – коефіцієнт теплопровідності, м²/с; λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К).

Критерій Re визначає режим руху середовища в умовах вимушеної конвекції та характеризує співвідношення між інерційною силою й силою внутрішнього тертя в рідині (в'язкості). Критерій Pr урахує вплив фізичних властивостей середовища на тепловіддачу. Критерій Gr характеризує співвідношення між підйомною силою, яка виникає внаслідок різниці густин холодних та гарячих об'ємів рідини при вільній конвекції, та силою в'язкості. Критерій Nu характеризує співвідношення між потоком теплоти від рідини до поверхні тіла (тепловіддачею) і потоком теплоти (теплопровідністю) в рідині біля стінки.

У процесі теплообміну температура рідини змінюється, отже змінюються її фізичні властивості. Температуру, за якою вибирають фізичні властивості ν , β , λ та інші, що входять до критеріїв подібності, називають визначальною. Як визначальну приймають температуру теплоносія або температуру стінки, або середню між цими температурами. При узагальненні досліджуваних даних важливим також є питання вибору визначального розміру l , який впливає на розвиток процесу і має входити до умов однозначності. Нерідко визначальні температуру та розмір вказують у формі підрядкового індексу біля критерію подібності.

Проаналізувавши диференціальні рівняння енергії, руху, тепловіддачі, суцільності та умови однозначності методами теорії подібності, можна отримати загальний вигляд функціонального зв'язку між критеріями подібності для різноманітних випадків конвективного теплообміну. Так, у випадку вільної конвекції у великому об'ємі критерій Nu визначається як функція критерію Релея $Ra = Gr Pr$, тобто

$$Nu = f(Gr Pr). \quad (3.6)$$

Теорія подібності по суті є теорією експерименту, яка дає відповіді на запитання, які величини слід вимірювати у досліді і як оброблювати їх результати. Вимірювати у досліді необхідно всі величини, які входять до критеріїв подібності. Результати досліді необхідно оброблювати у вигляді критеріїв подібності, а узагальнювати результати – у вигляді рівнянь подібності. При цьому узагальнені формули типу (3.6) дозволяють установити, як впливають на коефіцієнт тепловіддачі такі величини, як геометричний розмір системи l , кінематичний коефіцієнт в'язкості ν і т. д., які в досліді не змінювалися.

Кількісний зв'язок між критеріями подібності представляють у вигляді степеневих залежностей як найбільш простих і зручних функцій, які дозволяють описати практично будь-яку експериментальну криву. Перевіркою можливості застосування степеневих залежностей є той факт, що у логарифмічних координатах усі дослідні точки укладуться на прямій. Для вільної конвекції критеріальне рівняння (3.6) можна записати у вигляді степеневих залежностей

$$Nu = c(Gr Pr)^n, \quad (3.7)$$

де значення сталих c і n підлягають визначенню. Для цього за досліджуваними даними обчислюють значення критеріїв Нуссельта та Релея. Будується графік, в якому по осі ординат відкладають $\ln Nu$, а по осі абсцис – $\ln(Gr Pr)$. Злогарифмувавши рівняння (3.7), отримаємо

$$\ln Nu = \ln c + n \ln(Gr Pr). \quad (3.8)$$

Отже, в логарифмічних координатах досліджувані дані описуються прямолінійною залежністю. Величина n характеризує кутовий коефіцієнт отриманої прямої (рис. 3.3):

$$n = \frac{\ln \text{Nu}_2 - \ln \text{Nu}_1}{\ln(\text{Gr Pr})_2 - \ln(\text{Gr Pr})_1}. \quad (3.9)$$

Рівняння (3.8) дозволяє визначити сталу c за знайденим значенням n . Значення c і n залежать від діапазону зміни аргументу, тобто критерію Ra .

Оскільки критеріальні рівняння отримують на основі експерименту, необхідно в кожному випадку враховувати: діапазон застосовуваності отриманого рівняння, який характеризується значеннями визначальних критеріїв подібності; які температура та розмір приймаються як визначальні.

Для інженерних розрахунків теплообміну при природній конвекції використовується ряд рівнянь подібності. Місцеві коефіцієнти тепловіддачі на вертикальній поверхні в діапазоні зміни критерію Релея від 10^3 до 10^9 (ламінарна область) при постійній густині теплового потоку на стінці ($q_{\text{ст}} = \text{const}$) розраховуються за рівнянням

$$\text{Nu}_{x,p} = 0,6(\text{Gr}_x \text{Pr})_p^{0,25} \left(\frac{\text{Pr}_p}{\text{Pr}_{\text{ст}}} \right)^{0,25}. \quad (3.10)$$

Середні коефіцієнти тепловіддачі на вертикальній поверхні у тій же ламінарній області течії можна розрахувати за рівнянням

$$\bar{\text{Nu}}_{l,p} = 0,75(\text{Gr}_l \text{Pr})_p^{0,25} \left(\frac{\text{Pr}_p}{\text{Pr}_{\text{ст}}} \right)^{0,25}. \quad (3.11)$$

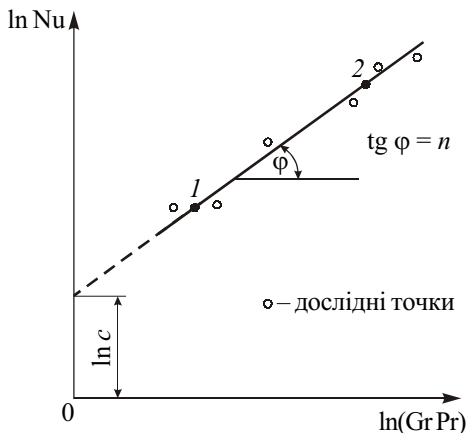


Рис. 3.3. Графічний спосіб визначення степеневої залежності між змінними

Турбулентна течія у прилежовому шарі на вертикальній поверхні спостерігається при $(Gr_x Pr)_p \geq 6 \cdot 10^{10}$. У цій області місцевий коефіцієнт тепловіддачі можна визначити за рівнянням

$$Nu_{x,p} = 0,15 (Gr_x Pr)_p^{0,33} \left(\frac{Pr_p}{Pr_{ct}} \right)^{0,25}. \quad (3.12)$$

Визначальний розмір у (3.10) і (3.12) – координата x , а в (3.11) – довжина пластини l , які відраховуються від початку теплообміну. Визначальна температура – температура рідини вдалині від поверхні (Pr_{ct} вибирається за температурою теплоносія на стінці). Співвідношення $(Pr_p / Pr_{ct})^{0,25}$ урахує вплив зміни теплофізичних властивостей теплоносія з температурою на тепловіддачу. При турбулентній течії коефіцієнт тепловіддачі не залежить від координати x , що випливає з (3.12).

Опис експериментальної установки

Плоска пластина – калориметр *1* (рис. 3.4) – розміщена на стенді у достатньо великому об'ємі так, щоб звести до мінімуму вплив випадкових вимушених потоків повітря на процеси біля поверхні.

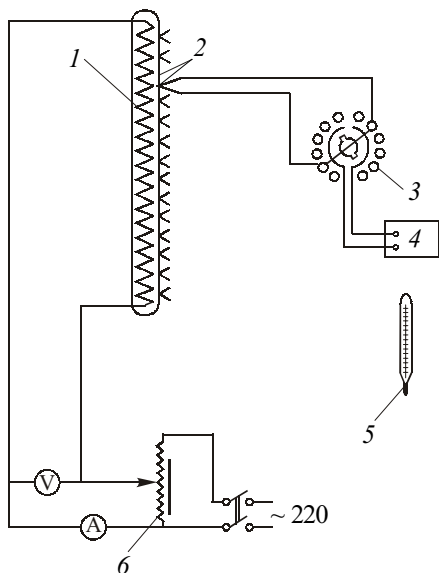


Рис. 3.4. Схема експериментальної установки для дослідження тепловіддачі вертикальної пластини до вільного потоку

повітря:

1 – досліджувана пластина; *2* – нагрівачі спіраль термопар; *3* – перемикач термопар; *4* – цифровий мілівольтметр; *5* – термометр; *6* – автотрансформатор

Пластина виготовлена з ізоляційного матеріалу з малим коефіцієнтом теплопровідності, що зменшує перетікання теплоти в стінці калориметра і дозволяє створити на поверхні практично постійну густину теплового потоку. Обігрівання обох поверхонь пластини здійснюється за допомогою одного внутрішнього електричного нагрівника. Нагрівник приєднаний до мережі змінного струму через автотрансформатор 6, за допомогою якого змінюється потужність струму. Параметри струму вимірюються вольтметром і амперметром.

Температура по висоті калориметра вимірюється термопарами 2, гарячі спаї яких розміщені всередині однієї з його поверхонь. Декілька термопар розміщено по ширині калориметра для контролю перетікань теплоти до бокових торцевих поверхонь. Термопари (18 шт.) розташовані по висоті частини калориметра, яка обігрівается, з визначеним кроком. Кінці гарячих спаїв усіх термопар підведені до перемикача 3. Холодні спаї знаходяться у навколишньому повітрі, температура якого вимірюється термометром 5. Вимірюється ЕРС термопар цифровим мілівольтметром 4.

Порядок виконання роботи

1. Включити стенд, підготувати до роботи прилади.
2. Визначити момент часу, коли настане стаціонарний тепловий режим. Із цією метою через кожні 3...5 хв треба вимірювати показання однієї з термопар. Якщо показання не змінюються, можна починати вимірювання.
3. Записати показання приладів до протоколу досліджуваних даних.
4. Установити автотрансформатором параметри електричного струму для наступного режиму.

Вимірювання провести для трьох заданих значень потужності нагрівника.

Протокол експериментальних даних

Роботу виконав студент _____ групи № ____

Розміри ділянки калориметра, що обігрівается: висота $a = __\text{ м}$;
ширина $b = __\text{ м}$

Температура навколишнього повітря $t_{\text{пов}} = __\text{ }^{\circ}\text{C}$

$E_{x.c} = \underline{\hspace{1cm}}$ мВ – поправка до термоЕРС термопар на температуру холодного спаю (визначається з табл. 1Д за $t_{\text{пов}}$)

Номер режиму			I			II			III		
Струм I , А											
Напруга U , В											
Номер термопар	Крок термопар Δx , мм	Координати x , мм	$E_{\text{вим}}$	$E_{\text{прив}}$	$t_{\text{ст}}^x$, °C						
			мВ								
1											
2											
3											
...											
18											

Примітки. Розміри калориметра, крок та координати термопар указані на стенді; $E_{\text{вим}}$ – вимірюване мілівольтметром значення термоЕРС термопар; $E_{\text{прив}} = E_{\text{вим}} + E_{x.c}$ – приведенне до нульової температури значення термоЕРС; $t_{\text{ст},x}$ – місцеві температури поверхні калориметра, знайдені за $E_{\text{прив}}$ з табл. 1Д.

Викладач _____ (підпис)

Методика обробки експериментальних даних

1. За досліджуваними значеннями температур поверхні калориметра будуються графіки $t_{\text{ст},x} = f(x)$ для кожного режиму (рис. 3.5).

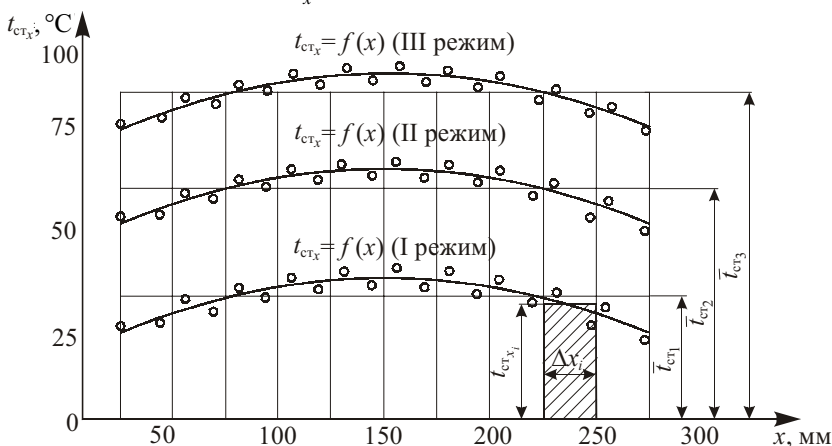


Рис. 3.5. Визначення середньої температури поверхні калориметра

2. Обчислюється для кожного режиму середня температура поверхні калориметра $\bar{t}_{\text{ст}}$ як середньоінтегральне планіметричне значення. Для цього користуються яким-небудь наближеним способом, наприклад прямокутників, а весь діапазон графічного інтегрування розділяють на $n = 10$ або більше рівних частин (див. рис. 3.5):

$$\bar{t}_{\text{ст}} = \frac{\sum_{i=1}^n t_{\text{ст} x_i} \Delta x_i}{\sum_{i=1}^n \Delta x_i} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_{\text{ст} x_i}.$$

3. Розраховується середня густина результуючого теплового потоку випромінюванням між поверхнею калориметра й оточуючими тілами за формулою, Вт/м²,

$$\bar{q}_{\text{вип}} = \varepsilon c_0 \left[\left(\frac{\bar{t}_{\text{ст}} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{\text{пов}} + 273}{100} \right)^4 \right],$$

де $\varepsilon = 0,8$ – інтегральний ступінь чорноти поверхні калориметра; $c_0 = 5,67$ Вт/(м²·К⁴) – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла.

4. Тепловий потік, що виділяється в нагрівнику, Вт,

$$Q = IU.$$

5. Визначається конвективна складова густини теплового потоку, Вт/м²,

$$\bar{q}_{\text{к}} = \frac{Q}{F} - \bar{q}_{\text{вип}},$$

де $F = 2ab$ – площа поверхні теплообміну, м².

6. Розраховується середній коефіцієнт тепловіддачі для кожного режиму, Вт/(м²·К),

$$\bar{\alpha} = \frac{\bar{q}_{\text{к}}}{\Delta t} = \frac{\bar{q}_{\text{к}}}{\bar{t}_{\text{ст}} - t_{\text{пов}}}.$$

7. Будується графік залежності $\bar{\alpha} = f(\bar{\Delta t})$.

Далі для одного з режимів за вказівкою викладача розраховуються місцеві коефіцієнти тепловіддачі.

8. За місцевими значеннями температур стінки для вибраного режиму визначається місцева густина теплового потоку випромінюванням, Вт/м²,

$$q_{\text{вип}_x} = \varepsilon c_0 \left[\left(\frac{t_{\text{ст}_x} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{\text{пов}} + 273}{100} \right)^4 \right].$$

9. Визначається місцева густина теплового потоку конвекцією, Вт/м²,

$$q_{\text{к}_x} = \frac{Q}{F} - q_{\text{вип}_x}.$$

10. Розраховується місцевий коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К),

$$\alpha_x = \frac{q_{\text{к}_x}}{\Delta t_x} = \frac{q_{\text{к}_x}}{t_{\text{ст}_x} - t_{\text{пов}}}.$$

11. Будується графік залежності $\alpha_x = f(x)$ (див. рис. 3.2).

Далі розрахунки зводять до таблиці.

№ з/П	$\text{Nu}_{x,p} = \frac{\alpha_x x}{\lambda_p}$	$\ln \text{Nu}_{x,p}$	$(\text{Gr}_x \text{Pr})_p = \frac{g \beta_p (t_{\text{ст}_x} - t_{\text{пов}}) x^3}{\nu_p^2} \text{Pr}_p$	$\ln(\text{Gr}_x \text{Pr})_p$
1				
2				
3				
...				
18				

Примітки. Фізичні властивості повітря λ_p , ν_p та критерій Pr_p вибирають з табл. 2Д за визначальною температурою $t_{\text{пов}}$, а $\beta_p = 1/(t_{\text{пов}} + 273)$; x – координата розрахункової точки, м.

12. Будується графік залежності $\ln \text{Nu}_{x,p} = f(\ln(\text{Gr}_x \text{Pr})_p)$ (див. рис. 3.3).

13. Визначається постійна n за рівнянням (3.9) і c – за (3.8).

14. Результати дослідів у безрозмірній формі слід порівняти з рівняннями (3.10) або (3.12) у залежності від діапазону досліджень, який визначається добутком $(Gr_x Pr)_p$.

Звіт по роботі

1. Принципова схема установки.
2. Протокол вимірювань.
3. Обробка експериментальних даних.
4. Графіки $t_{ст_x} = f(x)$, $\bar{\alpha} = f(\Delta t)$, $\alpha_x = f(x)$, $\ln Nu_{x,p} = f(\ln(Gr_x Pr)_p)$.
5. Висновки.

Контрольні питання

1. Яка фізична природа вільного конвективного руху?
2. Як розраховують місцеві та середні коефіцієнти тепловіддачі?
3. Які фактори впливають на коефіцієнт тепловіддачі при природній конвекції?
4. Які величини вимірюються в ході експерименту?
5. Як визначається конвективна складова теплового потоку?
6. Чому досліджувані результати слід представляти у вигляді зв'язку між безрозмірними комплексами – критеріями подібності?
7. Який вигляд має критеріальне рівняння для природної конвекції?
8. Який фізичний зміст критеріїв подібності, що входять до критеріального рівняння для природної конвекції?
9. Що називають визначальною температурою та визначальним геометричним розміром?

Лабораторна робота № 3.2

Вивчення тепловіддачі вертикального циліндра до вільного потоку повітря

Мета роботи: вивчення основних закономірностей теплообміну при природному конвективному русі повітря, ознайомлення з методикою дослідження процесів тепловіддачі.

У роботі визначаються місцеві та середні значення коефіцієнтів тепловіддачі на досліджуваній поверхні й установлюється вплив на тепловіддачу протяжності поверхні та температурного напору. Досліджувані дані оброблюються в узагальненому вигляді й порівнюються з існуючими розрахунковими формулами.

Перед виконанням роботи необхідно ознайомитися з короткими відомостями з теорії лабораторної роботи № 3.1.

Опис експериментальної установки

Схема установки зображена на рис. 3.6. Об'єктом дослідження є вертикальна азбоцементна труба 2 (калориметр), поверхня якої обігривається електричним нагрівником 1 від мережі електричного струму. Потужність обігріву регулюється за допомогою автотрансформатора 3 та вимірюється амперметром і вольтметром.

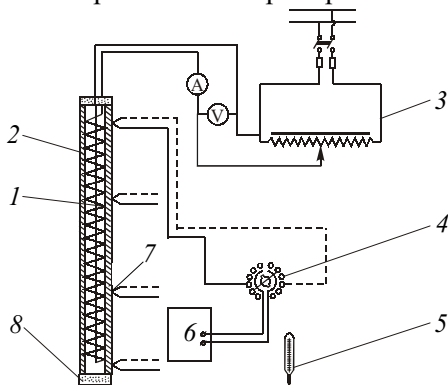


Рис. 3.6. Схема експериментальної установки для дослідження тепловіддачі вертикального циліндра до вільного потоку повітря:

1 – нагрівник; 2 – досліджуваний
циліндр; 3 – автотрансформатор;
4 – перемикач термопар; 5 – термо-
метр; 6 – цифровий мілівольтметр;
7 – гарячі спаї термопар; 8 – торцеві
заглушки

Температура поверхні калориметра вимірюється термопарами 7. Гарячі спаї термопар (12 шт.) розташовані по висоті труби з визначеним кроком і підключені до перемикача 4. Вимірюється ЕРС термопар цифровим мілівольтметром 6, а температура навколишнього середовища – термометром 5. У середині труби розміщена набивка з теплоізоляційного матеріалу, а торці калориметра закриті заглушками 8 для зменшення теплових втрат.

Порядок виконання роботи, протокол експериментальних даних, методика обробки досліджуваних даних, вимоги до звіту, а також контрольні запитання наведені в лабораторній роботі № 3.1.

Лабораторна робота № 3.3

Вивчення тепловіддачі горизонтального циліндра до вільного потоку повітря

Мета роботи: вивчення основних закономірностей теплообміну при природному конвективному русі повітря, ознайомлення з методикою дослідження процесів тепловіддачі.

У роботі визначаються місцеві та середні значення коефіцієнтів тепловіддачі на досліджуваній поверхні, встановлюється вплив на тепловіддачу температурного напору, а також зміна тепловіддачі по окру-

жності циліндра. Досліджувані дані оброблюються в узагальненому вигляді й порівнюються з існуючими розрахунковими формулами.

Перед виконанням роботи необхідно ознайомитися з короткими відомостями з теорії лабораторної роботи № 3.1.

Для горизонтального циліндра критеріальне рівняння для розрахунку середніх коефіцієнтів тепловіддачі при вільному ламінарному русі ($10^3 \leq (Gr_d Pr)_p \leq 10^8$) має вигляд [1, 2, 4]

$$\overline{Nu}_{d,p} = 0,5 (Gr_d Pr)_p^{0,25} \left(\frac{Pr_p}{Pr_{ct}} \right)^{0,25} . \quad (3.13)$$

У (3.13) за визначальну температуру приймається температура рідини вдалині від поверхні, а за визначальний розмір – діаметр труби.

Опис експериментальної установки

Об'єктом дослідження є горизонтальний циліндр 1 (рис. 3.7), розміщений у великому об'ємі повітря. Обігрівання поверхні здійснюється електричним нагрівником від мережі електричного струму, потужність якого регулюється автотрансформатором. Для вимірювання потужності до електричного кола підключені вольтметр і амперметр. Основою циліндричного калориметра є азбоцементна труба. Коефіцієнт теплопровідності азбоцементу малий. Це зменшує перетікання теплоти в осьовому, радіальному й окружному напрямках і дозволяє створити на поверхні циліндра-калориметра постійну густину теплового потоку.

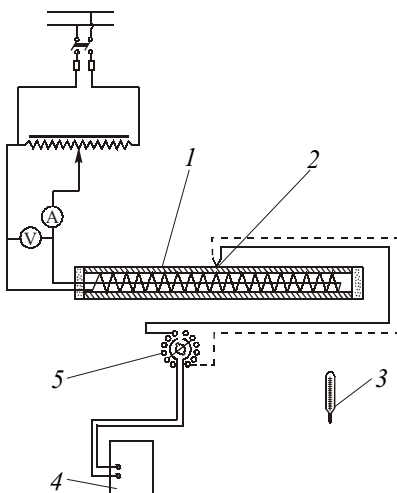


Рис. 3.7. Схема експериментальної установки для дослідження тепловіддачі горизонтального циліндра до вільного потоку повітря:

- 1 – досліджуваний циліндр;
- 2 – гарячі спаї термопар;
- 3 – термометр;
- 4 – цифровий мілівольтметр;
- 5 – перемикач термопар

Температура поверхні циліндра вимірюється термопарами 2, розташованими в середній частині калориметра рівномірно по окружності. Декілька термопар контролюють температуру вздовж циліндра.

Кінці гарячих спаїв усіх термопар підведені до перемикача 5. Вимірюється ЕРС термопар цифровим мілівольтметром 4, а температура навколишнього середовища – термометром 3. Торці циліндра закриті заглушками з теплоізоляційного матеріалу.

Робота виконується аналогічно лабораторним роботам № 3.1 і 3.2. Однак, на відміну від вертикальних поверхонь, для горизонтального циліндра місцеві коефіцієнти тепловіддачі змінюються по окружності циліндра. Тому в протоколі досліджуваних даних розміщення термопар указують у кутових градусах φ .

Методика обробки досліджуваних даних, вимоги до звіту і контрольні питання однакові з лабораторними роботами № 3.1 і 3.2. Відмінність полягає у наступному:

графік зміни місцевої температури по окружності циліндра будується у вигляді $t_{\text{ст}\varphi} = f(\varphi)$, де φ змінюється від 0 до 360° ;

середня температура поверхні циліндра визначається методом графічного інтегрування (див. рис. 3.5) за формулою

$$\bar{t}_{\text{ст}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_{\text{ст}\varphi i};$$

при визначенні місцевих коефіцієнтів тепловіддачі α_φ у розрахункових формулах індекс x слід замінити на φ ;

графік зміни місцевого коефіцієнта тепловіддачі по окружності циліндра будується у вигляді $\alpha_\varphi = f(\varphi)$;

при обробці досліджуваних даних у безрозмірній формі за визначальний розмір замість координати x приймається діаметр циліндра d ;

результати дослідів у безрозмірній формі слід порівняти із залежністю (3.13).

4. ТЕПЛООБМІН ПРИ ФАЗОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАННЯХ

Лабораторна робота № 4

Дослідження тепловіддачі при конденсації водяної пари на поверхні горизонтальної труби

Мета роботи: ознайомлення з методикою експериментального дослідження інтенсивності теплообміну при конденсації нерухомої чистої насиченої водяної пари на поверхні горизонтальної труби, а також процесу теплопередачі між парою й охолодною водою. Установлення залежності коефіцієнта тепловіддачі при конденсації пари від температурного напору і порівняння отриманої залежності з літературними даними.

Короткі відомості з теорії

Пара конденсується, тобто переходить у рідкий стан, на поверхні теплообміну, температура якої нижча за температуру насичення ($t_{\text{ст}} < t_{\text{н}}$), віддаючи поверхні теплоту пароутворення. Розрізняють краплинну конденсацію, коли конденсат, що утворюється, не змочує поверхню та скочується у вигляді окремих крапель, наприклад ртуть на сталевій стінці, і *плівкову* конденсацію, коли конденсат змочує поверхню й утворює суцільну плівку. Плівкова конденсація зустрічається значно частіше. При краплинній конденсації тепловіддача може бути у 5...10 разів вище, ніж при плівковій, бо плівка конденсату створює значний термічний опір передачі теплоти від пари до стінки.

На рис. 4.1, *a* показано, як формується плівка конденсату, що стікає вниз по вертикальній поверхні під дією сили тяжіння. Товщина плівки δ збільшується внаслідок конденсації пари на її поверхні. Режим течії плівки залежить від значення числа Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{w\delta}{\nu} = \frac{G_{\kappa}}{\mu},$$

де w – середня швидкість плівки у перерізі, що розглядається; δ – товщина плівки; ν і μ – відповідно коефіцієнти кінематичної та динамічної в'язкості конденсату; G_{κ} – витрата конденсату в розрахунку на одиницю ширини плівки, кг/(м·с).

На горизонтальній трубі утворення плівки конденсату відбувається з двох сторін криволінійної поверхні, тому

$$\text{Re} = \frac{G_{\kappa}}{2\mu l}, \quad (4.1)$$

де l – довжина труби.

Число Рейнольдса збільшується донизу разом з витратою конденсату G_k . Ламінарна течія з гладкою поверхнею плівки спостерігається при $Re < 5$. В інтервалі $5 \leq Re \leq 400$ ламінарна течія супроводжується утворенням хвиль на поверхні плівки (ламінарно-хвильовий режим), що зменшує її середню товщину. Коли число Рейнольдса перевищує критичне значення, яке приблизно дорівнює 400, спостерігається перехід до турбулентного режиму. Оскільки при цьому у верхній частині стінки є ділянка ламінарної течії, такий режим для поверхні в цілому називають змішаним.

По нормалі до ламінарної плівки тепло передається теплопровідністю, а через плівку, що стікає турбулентно, – ще й турбулентними пульсаціями. Інтенсивність теплообміну при конденсації визначається термічним опором плівки конденсату δ/λ_k .

Зменшення місцевого коефіцієнта тепловіддачі α_x донизу по поверхні в зоні ламінарної течії (рис. 4.1, б) пояснюється зростанням товщини плівки. Така ж причина зменшення α_x зі збільшенням температурного напору $\Delta t = t_n - t_{ст}$. При турбулентному режимі коефіцієнт тепловіддачі зростає донизу внаслідок підвищення інтенсивності турбулентного перенесення в плівці.

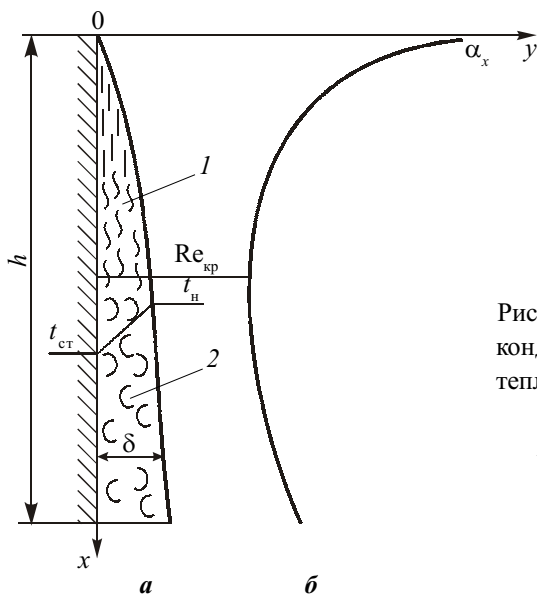


Рис. 4.1. Характер течії плівки конденсату (а) і зміна коефіцієнта тепловіддачі (б) уздовж вертикальної поверхні:

- 1 – ламінарно-хвильова течія;
- 2 – турбулентна течія

Теорія плівкової конденсації Нуссельта ґрунтується на таких основних передумовах: течія конденсату ламінарна; сила інерції, пов'язана з прискоренням руху плівки, дуже мала у порівнянні з силами в'язкості та тяжіння; тертя між плівкою і парою відсутнє; температура зовнішньої поверхні плівки дорівнює температурі насиченої пари; перенесення теплоти лімітується термічним опором плівки; фізичні параметри конденсату постійні. Для кращого погодження теорії з експериментом уводять поправки на інтенсифікуючу дію хвильового руху плівки (ε_v) і зміну фізичних параметрів конденсату в залежності від температури (ε_t).

Для розрахунку середнього коефіцієнта тепловіддачі при конденсації сухої насиченої нерухомої пари на горизонтальній трубі ($t_{ct} = \text{const}$) використовують формулу Нуссельта при віднесенні всіх фізичних властивостей до температури насичення t_n та введенні поправки ε_t [1, 2, 4]:

$$\bar{\alpha}_N = 0,728 \sqrt[4]{\frac{\lambda_n^3 r g (\rho' - \rho'')}{\nu_n (t_n - t_{ct}) d}} \varepsilon_t, \quad (4.2)$$

де ρ' і ρ'' – відповідно густина конденсату і пари, кг/м³; λ_n – коефіцієнт теплопровідності конденсату, Вт/(м·К); r – питома теплота пароутворення, Дж/кг; g – прискорення вільного падіння, м/с²; d – зовнішній діаметр труби, м.

Поправка ε_t визначається за формулою

$$\varepsilon_t = \left[\left(\frac{\lambda_{ct}}{\lambda_n} \right)^3 \frac{\mu_n}{\mu_{ct}} \right]^{\frac{1}{8}},$$

де λ_n і μ_n вибирають для конденсату при температурі насичення t_n , а λ_{ct} і μ_{ct} – при температурі стінки t_{ct} .

При конденсації на горизонтальній трубі хвильовий та турбулентний рух у плівці конденсату на практиці не виникає внаслідок малої протяжності поверхні по висоті. Якщо критерій фазового перетворення $K = r / (c_{pk} \Delta t) > 5$, теплотою переохолодження конденсату можна знехтувати, а розходження між результатами точного розв'язання і значеннями коефіцієнта тепловіддачі за формулою (4.2) становить лише кілька процентів.

Значно впливають на коефіцієнт тепловіддачі при конденсації швидкість потоку пари і наявність в ньому газів, що не конденсуються. Якщо

рух пари збігається з напрямком течії плівки, потік пари прискорює рух конденсату в плівці, її товщина зменшується і коефіцієнт тепловіддачі зростає. При русі пари у зворотному напрямку течія плівки гальмується, її товщина збільшується, а коефіцієнт тепловіддачі зменшується.

При наявності у парі газів (наприклад, повітря), що не конденсуються, тепловіддача при конденсації знижується. Це відбувається тому, що на холодній стінці конденсується тільки пара, а повітря залишається. При відсутності конвекції поступово повітря накопичується біля стінки і створює значну перешкоду надходженню пари до стінки.

При проектуванні конденсаційних пристроїв слід приділяти увагу правильному компонованню поверхонь нагріву з метою зменшення товщини плівки конденсату.

Опис експериментальної установки

Експериментальна установка (рис. 4.2) складається з горизонтально розташованої дослідної труби 1, що знаходиться в герметичному корпусі 2, парогенератора 6, обладнаного термометром 3 і манометром 5,

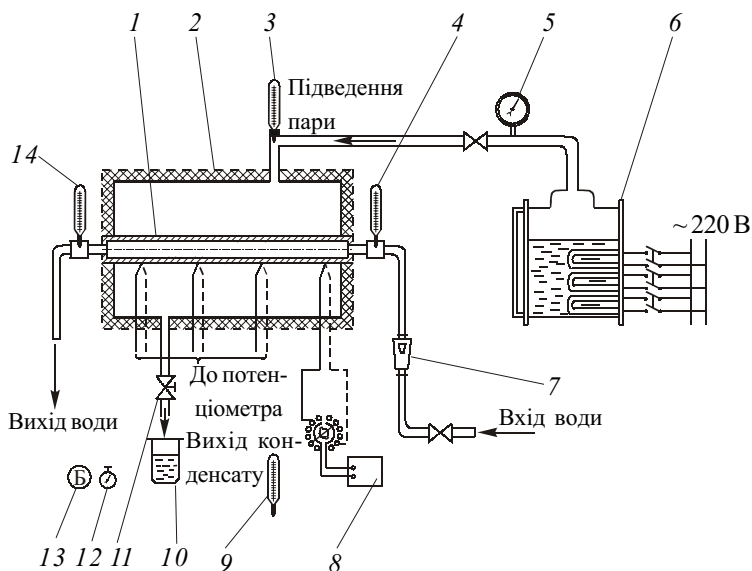


Рис. 4.2. Схема експериментальної установки для дослідження тепловіддачі при конденсації пари на горизонтальній трубі:

1 – дослідна труба; 2 – герметичний корпус; 3, 4, 9, 14 – термометри; 5 – манометр; 6 – парогенератор; 7 – ротамер; 8 – цифровий мілівольтметр; 10 – мірка посудини; 11 – вентиль; 12 – секундомір; 13 – барометр

систем підведення води й водяної пари до робочої ділянки, вимірювальних приладів. Дослідна труба зовні омивається водяною парою, а всередині труби протікає охолодна вода. До корпусу 2, де розміщена робоча ділянка, пара підводиться з парогенератора 6, що має три незалежні секції електронагрівників. Для зменшення теплових втрат до навколишнього середовища корпус вкритий тепловою ізоляцією. Зазор між стінками корпусу і труби достатньо великий, щоб вважати пару, яка конденсується, практично нерухомою.

До дослідної труби охолодна вода надходить через ротаметр 7, що вимірює її витрату. Кількість води і пари регулюється за допомогою вентилів. Температура насиченої пари, яка надходить до робочого простору, визначається за барометричним тиском, що вимірюється барометром 13. Температура поверхні стінки дослідної труби вимірюється термопарами, гарячі спаї яких розміщені в різних перерізах труби. Холодні спаї термопар знаходяться при температурі навколишнього середовища, яка вимірюється термометром 9. Вимірювання ЕРС термопар виконується цифровим мілівольтметром 8.

Витрата конденсату пари визначається за допомогою мірчої посудини 10, що триходовим вентилем 11 підключається до зливної магістралі. Час заповнення мірчої посудини конденсатом вимірюється секундоміром 12. Температура охолодної води на вході до труби вимірюється термометром 4, а на виході – термометром 14.

Порядок виконання роботи

1. Установити за ротаметром задану витрату охолодної води.
2. Включити всі три секції електронагрівників.
3. Визначити вихід установки на стаціонарний режим. Для цього необхідно вимірювати через кожні 2 хв значення термоЕРС однієї з термопар. Два однакових значення термоЕРС свідчать про настання стаціонарного режиму.
4. Виміряти після настання стаціонарного теплового режиму час заповнення мірчої посудини й витрату охолодної води, за показаннями термопар – температуру стінки труби, а за показаннями термометрів – температуру охолодної води на вході та виході з дослідної труби.
5. Записати барометричний тиск.

Вимірювання проводять для трьох режимів, які встановлюють за витратою охолодної води. На всіх режимах необхідно так регулювати кількість працюючих нагрівників парогенератора, щоб постійно був надлишок несконденсованої пари, а температура конденсату – близькою до температури насичення. Виміряні параметри заносять до протоколу.

Протокол експериментальних даних

Роботу виконав студент _____ групи № _____

Розміри дослідної труби: зовнішній діаметр $d_{\text{зов}} = 0,018$ м; внутрішній діаметр $d_{\text{вн}} = 0,014$ м; робоча довжина $l = 0,27$ м

Температура навколишнього повітря $t_{\text{пов}} = ___$ °С

$E_{\text{х.с}} = ___ \text{ мВ}$ – поправка до термоЕРС термопар на температуру холодного спаю (визначається з табл. 1Д за $t_{\text{пов}}$)

Барометричний тиск $p_6 = ___ \text{ мм рт. ст.}$

Об'єм мірчої посудини $V_{\text{м.п}} = 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$

Номер режиму	ТермоЕРС термопар				Показання рота-метра m	Час заповнення мірчої посудини τ , с	Температура охолодної води	
	E_1	E_2	...	E_{12}			на вході $t_{\text{р}}^{\text{вх}}$	на виході $t_{\text{р}}^{\text{вих}}$
	мВ						°С	
1								
2								
3								

Викладач _____ (підпис)

Методика обробки експериментальних даних

1. За барометричним тиском p_6 визначається з табл. 3Д температура насичення $t_{\text{н}}$, °С.

2. Визначається витрата конденсату для кожного режиму, кг/с,

$$G_{\text{к}} = \frac{\rho_{\text{к}} V_{\text{м.п.}}}{\tau},$$

де $\rho_{\text{к}}$ – густина конденсату при $t_{\text{н}}$ з табл. 5Д, кг/м³.

3. Розраховується тепловий потік, який передається від пари до труби, Вт,

$$Q = G_{\text{к}} r - Q_{\text{вт}},$$

де r – питома теплота пароутворення при $t_{\text{н}}$ з табл. 6Д, Дж/кг; $Q_{\text{вт}}$ – теплові втрати, Вт, за даними тарувальних іспитів становлять 10 % від загального теплового потоку $G_{\text{к}} r$.

4. Розраховується середнє значення термоЕРС термопар

$$\bar{E} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} E_i,$$

де n – кількість термопар для вимірювання температури стінки труби.

За $\bar{E}_{\text{ст}} = \bar{E} + E_{\text{x.c}}$ з табл. 1Д визначається середня температура стінки труби $\bar{t}_{\text{ст}}$.

5. За формулою Ньютона–Ріхмана для кожного режиму розраховується середній коефіцієнт тепловіддачі при конденсації водяної пари на поверхні горизонтальної труби, Вт/(м²·К),

$$\bar{\alpha}_k = \frac{Q}{F_{\text{зов}} (t_{\text{н}} - \bar{t}_{\text{ст}})},$$

де $F_{\text{зов}} = \pi d_{\text{зов}} l$ – площа зовнішньої поверхні дослідної труби, м².

6. Будується графік залежності $\bar{\alpha}_k = f(\Delta \bar{t})$, де $\Delta \bar{t} = t_{\text{н}} - \bar{t}_{\text{ст}}$.

7. Для порівняння в діапазоні досліджуваних даних $\Delta \bar{t}$ слід нанести графік залежності $\bar{\alpha}_N = f(\Delta \bar{t})$, де $\bar{\alpha}_N$ – коефіцієнт тепловіддачі, що розраховується за формулою Нуссельта (4.2).

8. Визначається режим руху плівки конденсату. Для цього за формулою (4.1) розраховується критерій Рейнольдса.

9. Розраховується середній коефіцієнт тепловіддачі від внутрішньої поверхні труби до охолодної води, Вт/(м²·К),

$$\bar{\alpha}_b = \frac{Q}{F_{\text{вн}} (\bar{t}_{\text{ст}} - \bar{t}_p)},$$

де $F_{\text{вн}} = \pi d_{\text{вн}} l$ – внутрішня поверхня труби, м²; $\bar{t}_p = 0,5(t_p^{\text{вх}} + t_p^{\text{вих}})$ – середня температура охолодної води, °С.

10. Розраховується лінійний коефіцієнт теплопередачі, що характеризує інтенсивність теплообміну між парою й охолодною водою, Вт/(м·К),

$$k_l = \frac{1}{\frac{1}{\bar{\alpha}_k d_{\text{зов}}} + \frac{1}{2\lambda_m} \ln\left(\frac{d_{\text{зов}}}{d_{\text{вн}}}\right) + \frac{1}{\bar{\alpha}_b d_{\text{вн}}}},$$

де λ_m – коефіцієнт теплопровідності матеріалу стінки труби, Вт/(м·К).

11. Визначається з рівняння суцільності середньовитратне значення швидкості води у трубі, м/с,

$$\overline{w}_B = \frac{G_B}{f\rho_B},$$

де G_B – витрата охолодної води на режимі, кг/с, визначається за показаннями ротаметра за допомогою тарувального графіка на стенді; f – поперечний переріз дослідної труби, м²; ρ_B – густина води, кг/м³, яка визначається з табл. 4Д у залежності від \bar{t}_p .

Звіт по роботі

1. Короткий опис роботи.
2. Протокол експериментальних даних.
3. Обробка результатів дослідів.
4. Графіки залежностей $\overline{\alpha}_K = f(\Delta\bar{t})$; $\overline{\alpha}_B = f(\overline{w}_B)$; $k_l = f(\overline{w}_B)$.
5. Зіставлення отриманих результатів дослідного вивчення тепловіддачі з даними теорії Нуссельта. На графік $\overline{\alpha}_K = f(\Delta\bar{t})$ накласти графік $\overline{\alpha}_N = f(\Delta\bar{t})$.
6. Висновки.

Контрольні питання

1. При яких умовах виникає процес конденсації? Які види конденсації та умови їх виникнення?
2. Для якого виду конденсації коефіцієнт тепловіддачі більше і чому?
3. Які режими руху плівки конденсату спостерігаються при конденсації пари на вертикальній поверхні?
4. Який критерій визначає режим руху плівки конденсату?
5. На яких передумовах ґрунтується теорія конденсації Нуссельта?
6. Які фактори впливають на інтенсивність процесу конденсації?

5. ТЕПЛООБМІН ВИПРОМІНЮВАННЯМ

Лабораторна робота № 5

Визначення інтегрального ступеня чорноти твердого тіла калориметричним методом

Мета роботи: вивчення основних закономірностей теорії променистого теплообміну, ознайомлення з методикою дослідження інтегрального ступеня чорноти твердого тіла.

Короткі відомості з теорії

Тепловим називають електромагнітне випромінювання, яке визначається температурою тіла. При температурах 273...4000 К теплове випромінювання займає інтервал довжин хвиль приблизно 0,7...1000 мкм, тобто включає в себе червону ділянку видимого спектра та інфрачервоне випромінювання аж до міліметрових хвиль. Видимий спектр (0,4...0,8 мкм) є тепловим випромінюванням поверхні Сонця, температура якої 6000 К.

Більшість твердих та рідких тіл випромінюють енергію всіх довжин хвиль в інтервалі від 0 до ∞ , тобто мають суцільний (неперервний) спектр випромінювання. До твердих тіл, спектр випромінювання яких суцільний, належать непровідники і напівпровідники електрики, метали з окисленою шорсткою поверхнею. Метали з полірованою поверхнею, багатоатомні гази і пари (CO_2 , H_2O та ін.) характеризуються селективним (переривистим) спектром випромінювання. Одноатомні та двоатомні гази прозорі для інфрачервоного випромінювання. Тверді тіла випромінюють і поглинають енергію тонким поверхневим шаром. Випромінювання та поглинання газів має об'ємний характер. Інтенсивність випромінювання залежить від природи тіла, його температури, довжини хвилі, стану поверхні, а для газів – ще від товщини шару і тиску.

Залежність інтенсивності випромінювання від температури значно більша, ніж у процесах теплопровідності й конвекції. Тому при високих температурах основним видом перенесення є теплове випромінювання.

Поверхневою густиною потоку випромінювання E , Вт/м², називають величину $E = dQ/dF$, де dQ – енергія, Вт, яка випромінюється площею dF , м², за всіма напрямками півсфери (рис. 5.1, а).

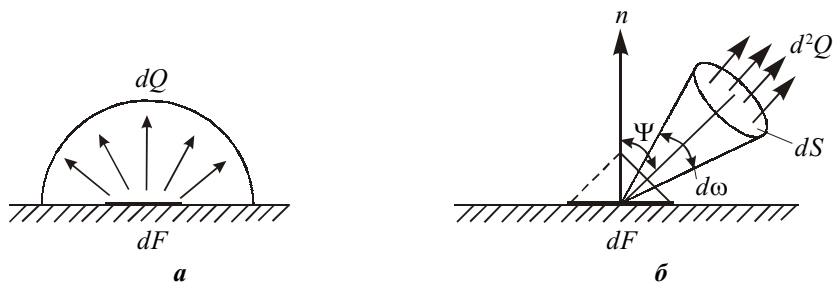


Рис. 5.1. Визначення поняття густини потоку (а) та інтенсивності (б) випромінювання

Інтенсивність (яскравість) випромінювання L , Вт/(ср·м²), визначається співвідношенням

$$L = \frac{d^2 Q}{d\omega dF \cos \psi},$$

де $d^2 Q$, Вт, – енергія, що випромінюється площадкою dF , м², усередині тілесного кута $d\omega$, ср, у напрямку, який складає кут ψ з нормаллю (рис. 5.1,б).

Для дифузних випромінювачів інтенсивність випромінювання не залежить від напрямку, тому

$$E = L\pi; \quad d^2 Q = \frac{E}{\pi} dF \cos \psi d\omega.$$

Останній вираз називають законом Ламберта (законом косинусів).

Величини E і L є інтегральними характеристиками, тобто відносяться до сумарного випромінювання за всіма довжинами хвиль. Спектральна густина E_λ та інтенсивність L_λ випромінювання записуються у вигляді

$$E_\lambda = \frac{dE}{d\lambda}; \quad L_\lambda = \frac{dL}{d\lambda},$$

де dE і dL – характеристики випромінювання в інтервалі довжин хвиль від λ до $\lambda + d\lambda$. Зв'язок між спектральними й інтегральними величинами виражається у формулах

$$E = \int_0^\infty E_\lambda d\lambda; \quad L = \int_0^\infty L_\lambda d\lambda.$$

Розрізняють власне ($E_{\text{вл}}$), падаюче ($E_{\text{пад}}$), відбите ($E_{\text{від}}$), поглинуте ($E_{\text{погл}}$), ефективне ($E_{\text{еф}}$) і результуюче ($E_{\text{рез}}$) випромінювання. Власне випромінювання визначається виключно температурою й оптичними властивостями поверхні. Падаючий на непрозору поверхню променистий потік частково відбивається і частково поглинається: $E_{\text{пад}} = E_{\text{від}} + E_{\text{погл}}$. Ділення обох частин рівності на $E_{\text{пад}}$ приводить до співвідношення

$$1 = R + A,$$

де $R = E_{\text{від}}/E_{\text{пад}}$ – коефіцієнт відбиття; $A = E_{\text{погл}}/E_{\text{пад}}$ – коефіцієнт поглинання.

Отже, якщо тіло добре відбиває променисту енергію, воно погано її поглинає. Для абсолютно чорного тіла $A = 1$ і $R = 0$.

Густина потоку ефективного випромінювання визначається як

$$E_{\text{еф}} = E_{\text{вл}} + E_{\text{від}}.$$

Результуюче випромінювання – це різниця між власним випромінюванням тіла і тією частиною падаючого зовнішнього випромінювання, яке поглинається цим тілом:

$$E_{\text{рез}} = E_{\text{вл}} - E_{\text{погл}}.$$

Величина $E_{\text{рез}}$ визначає потік енергії, який дане тіло передає оточуючим його тілам у процесі променистого теплообміну.

Закон Планка встановлює співвідношення між спектральною густиною випромінювання абсолютно чорного тіла $E_{0\lambda}$, довжиною хвилі λ та абсолютною температурою T :

$$E_{0\lambda} = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{\exp(c_2 / (\lambda T)) - 1},$$

де $c_1 = 3,74 \cdot 10^{-16} \text{ Вт} \cdot \text{м}^2$; $c_2 = 1,44 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{К}$.

Зі збільшенням температури зростає рівень випромінювання на всіх довжинах хвиль і відбувається зміщення максимуму випромінювання у бік коротких хвиль.

Закон Стефана–Больцмана визначає залежність інтегральної густини потоку випромінювання абсолютно чорного тіла від температури:

$$E_0 = \sigma_0 T^4.$$

Величина $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ є сталою Стефана–Больцмана.

У технічних розрахунках закон Стефана–Больцмана зручно застосовувати в іншій формі:

$$E_0 = c_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4,$$

де $c_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла.

Спектральним й інтегральним ступенем чорноти реальних тіл називають величини $\varepsilon_\lambda = E_\lambda / E_{0\lambda}$ і $\varepsilon = E / E_0$. Для сірих тіл при фіксованій температурі $\varepsilon_\lambda = \text{const}$; $\varepsilon_\lambda = \varepsilon$. У відповідності до закону Кірхгофа $\varepsilon_\lambda(T) = A_\lambda(T) \leq 1$. Для сірих тіл рівні й інтегральні характеристики $\varepsilon(T) = A(T) \leq 1$.

Ступінь чорноти є залежить від природи тіла, його температури, стану поверхні. Для металів із збільшенням температури вона зростає. При шорсткості поверхні, її забрудненні або окисненні є може збільшуватися у декілька разів. Наприклад, для полірованого алюмінію $\varepsilon = 0,04 \dots 0,06$, при окисненні його поверхні $\varepsilon = 0,2 \dots 0,3$. Значення ε у залежності від температури і стану поверхні для різних матеріалів визначають дослідним шляхом.

Власне випромінювання реальних тіл розраховують за формулою

$$E_{\text{вл}} = \varepsilon c_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4.$$

Кутовим коефіцієнтом випромінювання називають величину

$$\varphi_{12} = \frac{Q_{12}}{Q_1},$$

де $Q_1 = E_{\text{сф}1} F_1$ – повний потік випромінювання тіла 1 за всіма напрямками; $Q_{12} = E_{\text{пад}2} F_2$ – частка потоку випромінювання тіла 1, що падає на тіло 2. Для дифузного випромінювання кутові коефіцієнти визначаються виключно геометрією системи. Розглядаючи термодинамічну рівновагу тіл i та j , які обмінюються теплотою випромінювання, отримують властивість взаємності кутових коефіцієнтів: $\varphi_{ij} F_i = \varphi_{ji} F_j$. Властивість замкнутості $\sum_{j=1}^N \varphi_{ij} = 1$ випливає із закону збереження енергії для замкнутої

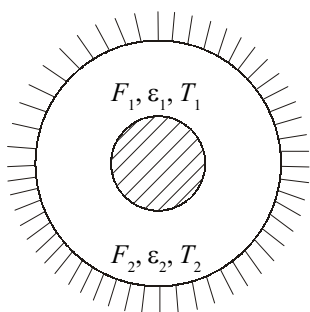


Рис. 5.2. Променистий теплообмін між тілом та його оболонкою

системи N тіл. Кутовий коефіцієнт φ_{ii} дорівнює нулю у випадку неувігннутих (плоских і опуклих) тіл.

У випадку теплообміну випромінюванням між тілом, яке не має ввігнутості, та його оболонкою (рис. 5.2)

$\varphi_{12} = 1$, $\varphi_{21} = F_1/F_2$ і результуючий потік випромінювання, Вт, виражається формулою [2, 4]

$$Q_{12} = \varepsilon_{12} c_0 F_1 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (5.1)$$

де приведений ступінь чорноти

$$\varepsilon_{12} = \frac{1}{1/\varepsilon_1 + F_1(1/\varepsilon_2 - 1)/F_2}. \quad (5.2)$$

Коли тіло випромінює у необмежений простір ($F_2 \gg F_1$), з (5.2) випливає, що $\varepsilon_{12} = \varepsilon_1$, тобто приведений ступінь чорноти визначається ступенем чорноти меншого тіла. У цьому випадку формулою (5.1) можна користуватися для визначення ступеня чорноти меншого тіла:

$$\varepsilon_1 = \frac{Q_{12}}{c_0 F_1 \left[(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4 \right]}. \quad (5.3)$$

Співвідношення (5.3) лежить в основі калориметричного методу визначення інтегрального ступеня чорноти тіл. У калориметричному методі інтегральний ступінь чорноти визначається за тепловим потоком Q_{12} , що випромінює досліджуване тіло, і температурами поверхонь T_1 і T_2 . Поверхня досліджуваного тіла може передавати теплоту не тільки випромінюванням, але й конвекцією і теплопровідністю. Однак при достатньому розрідженні повітря тепловий потік від тіла передається практично тільки за рахунок випромінювання, тому з внутрішньої порожнини калориметра необхідно відкачувати повітря до тиску приблизно 10^{-5} мм рт. ст. З іншими методами (радіаційним, регулярного режиму) можна ознайомитися в [3, 5, 6].

Опис експериментальної установки

Дослідний зразок 2 трубчастої форми довжиною 150 мм і зовнішнім діаметром 10 мм підвішений у середній частині вакуум-балона 1 великих розмірів: діаметром 450 мм і висотою 700 мм (рис. 5.3). Усередині зразка розміщений електронагрівник. Електрична потужність регулюється автотрансформатором 6 та вимірюється амперметром 7 і вольтметром 8. Вакуум у балоні 1 створюється електричним ротаційним вакуумним насосом 4 і вимірюється деформаційним зразковим вакуумметром 5. Для регулювання вакууму на вакуум-балоні встановлений клапан 3.

Температура поверхні зразка вимірюється хромель-копелевою терморпарою 9 і цифровим вольтметром 10. Гарячий спай терморпари закріплений у середній частині зразка. Холодний спай терморпари знаходиться при температурі оточуючого повітря, параметри якого контролюються термометром 11 та барометром 12. Температура внутрішньої поверхні вакуум-балона приймається рівною температурі оточуючого повітря.

Зверху вакуум-балон герметично закритий кришкою, на якій установлені чотири електрично ізолювані шпильки, через які підводиться електричний струм та відводиться термоЕРС.

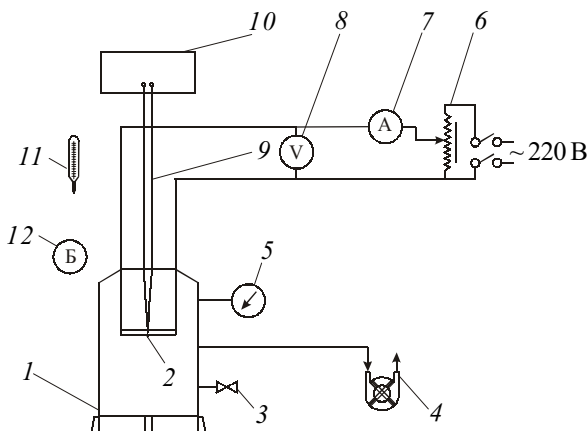


Рис. 5.3. Схема експериментальної установки для визначення інтегрального ступеня чорноти:

1 – вакуум-балон; 2 – дослідний зразок; 3 – клапан; 4 – вакуум-насос; 5 – вакуумметр; 6 – автотрансформатор; 7 – амперметр; 8 – вольтметр; 9 – термопара; 10 – цифровий мілівольтметр; 11 – термометр; 12 – барометр

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з експериментальною установкою, конструкцією і правилами користування приладами.

2. Включити електроживлення нагрівника й автотрансформатором установити спад напруги $U = 4,0$ В для першого режиму.

3. Включити вакуум-насос і за допомогою клапана 3 установити перше значення розрідження у вакуум-балоні (70 поділок за вакуумметром).

4. Після виходу установки на стаціонарний режим виміряти мілівольтметром 10 термоЕРС. Режим вважається стаціонарним, якщо протягом трьох послідовно виконаних вимірювань з інтервалом у 3 хв показання мілівольтметра залишаються незмінними.

5. При незмінному спаді напруги виміряти термоЕРС при двох нових значеннях розрідження у вакуум-балоні (80 і 90 поділок). Контроль виходу установки на стаціонарний режим робиться аналогічно.

6. Провести вказані вимірювання ще на двох режимах, які відповідають спаду напруги $U = 7,0$ В і $10,0$ В.

Під час дослідів записувати барометричний тиск та температуру навколишнього повітря.

Отримані в ході роботи дані заносять до протоколу.

Протокол експериментальних даних

Роботу виконав студент _____ групи № ____

Матеріал дослідного зразка (наведений на стенді) _____

Розміри дослідного зразка (наведені на стенді): довжина $l =$ ____ м;
діаметр $d =$ ____ м

Температура навколишнього повітря $t_{\text{пов}} =$ ____ °C

$E_{\text{х.с}} =$ ____ мВ – поправка до термоЕРС на температуру холодного спаю (визначається з табл. 1Д за $t_{\text{пов}}$)

Барометричний тиск $p_6 =$ ____ мм рт. ст.

Номер режиму	I			II			III		
Спад напруги U , В									
Струм I , А									
Вакуум $p_{\text{вак}}$, под.									
ТермоЕРС $E_{\text{вим}}$, мВ									
Приведена термоЕРС $E_{\text{прив}}$, мВ									
Температура стінки зразка $t_{\text{ст}}$, °C									

Примітки. $E_{\text{вим}}$ – вимірюване мілівольтметром значення термоЕРС термопари; $E_{\text{прив}} = E_{\text{вим}} + E_{\text{х.с}}$ – приведенне до нульової температури значення термоЕРС; $t_{\text{ст}}$ – температура стінки зразка, яка визначається з табл. 1Д за $E_{\text{прив}}$.

Викладач _____ (підпис)

Методика обробки експериментальних даних

1. Одиниця виміру значення вакууму $p_{\text{вак}}$, у поділках, переводиться у мм рт. ст. за допомогою градуювального графіка вакуумметра, наведеного на стенді.

2. Визначається абсолютний тиск у вакуум-балоні, мм рт. ст.,

$$p_{\text{абс}} = p_6 - p_{\text{вак}}.$$

3. Будуються для кожного режиму графічні залежності між рі-

зницією температур $\Delta t = t_{\text{ст}} - t_{\text{пов}}$ і значенням абсолютного тиску в степені $0,25 p_{\text{абс}}^{0,25}$ (рис. 5.4).

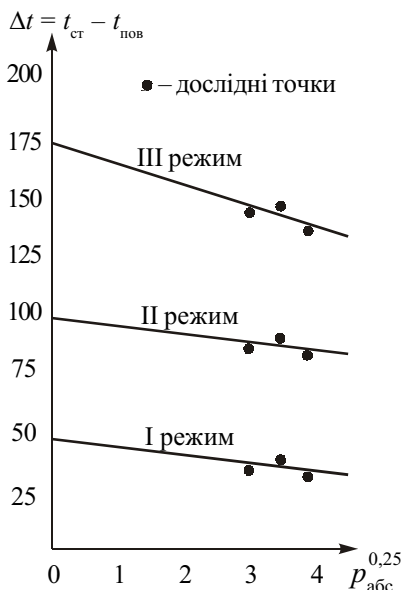


Рис. 5.4. Графічне визначення температури стінки зразка при $p_{\text{абс}} = 0$

4. Подовживши графіки до перехрещення з віссю ординат, визначаються різниці температур Δt_0 , які відповідають $p_{\text{абс}} = 0$.

5. Розраховується для кожного режиму температура стінки зразка, °С,

$$t_{\text{зр}} = \Delta t_0 + t_{\text{пов}}.$$

6. Визначається за формулою (5.3) інтегральний ступінь чорноти зразка. У формулі тепловий потік випромінюванням $Q_{12} = IU$ Вт; поверхня зразка $F_1 = \pi dl$ м²; температура стінки зразка $T_1 = t_{\text{зр}} + 273$ К; температура внутрішньої поверхні вакуум-балона $T_2 = t_{\text{пов}} + 273$ К.

7. Будується графік залежності $\varepsilon = f(t_{\text{зр}})$.

8. Отримані значення ε порівнюються зі значеннями інтегрального ступеня чорноти для досліджуваного матеріалу з табл. 7Д.

Звіт по роботі

1. Короткі відомості з теорії теплового випромінювання.
2. Принципова схема установки із зазначенням її елементів.
3. Протокол досліджуваних даних.
4. Розрахунки з обробки результатів досліджень.
5. Графіки залежностей $\Delta t = f(p_{\text{абс}}^{0,25})$ і $\varepsilon = f(t_{\text{зр}})$.
6. Зіставлення отриманих результатів з довідковими даними.
7. Висновки.

Контрольні питання

1. Яка фізична сутність процесу теплового випромінювання?
2. У чому різниця між інтегральним і спектральним потоками випромінювання?
3. Що називають результуючим потоком випромінювання?
4. Як змінюється запис закону Стефана–Больцмана, якщо його застосувати до сірих тіл? У чому фізичний зміст ступеня чорноти?
5. У чому фізичний зміст кутових коефіцієнтів та які їх властивості?
6. У чому сутність калориметричного методу визначення ступеня чорноти тіл?

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *Димо Б.В.* Практикум з тепломасообміну: Навч. посіб. – Миколаїв: УДМТУ, 2003. – 136 с.
2. *Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С.* Теплопередача. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.
3. Лабораторный практикум по термодинамике и теплопередаче: Учеб. пособие для энергомашиностроит. спец. вузов / *В.Н. Афанасьев, А.А. Афонин, С.И. Исаев* и др.; Под ред. *В.И. Крутова, Е.В. Шишова*. – М.: Высш. шк., 1988. – 216 с.
4. *Михеев М.А., Михеева И.М.* Основы теплопередачи. – 2-е изд., стереотип. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.
5. *Осипова В.А.* Экспериментальное исследование процессов теплообмена. – М.: Энергия, 1969. – 344 с.
6. Практикум по теплопередаче: Учеб. пособие для вузов / *А.П. Солодов, Ф.Ф. Цветков, А.В. Елисеев, В.А. Осипова*; Под ред. *А.П. Солодова*. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 296 с.

ДОДАТКИ

Таблиця 1Д. Стандартне градуювання термомар типу ТХК при температурі холодного сну 0 °С

Температура гарячого сну, °С	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	mB									
0	0	0,07	0,13	0,20	0,26	0,33	0,39	0,46	0,52	0,59
10	0,65	0,72	0,78	0,85	0,91	0,98	1,05	1,11	1,18	1,24
20	1,31	1,38	1,44	1,51	1,57	1,64	1,70	1,77	1,84	1,91
30	1,98	2,05	2,12	2,18	2,25	2,32	2,38	2,45	2,52	2,59
40	2,66	2,73	2,80	2,87	2,94	3,00	3,07	3,14	3,21	3,28
50	3,35	3,42	3,49	3,56	3,63	3,70	3,77	3,84	3,91	3,98
60	4,05	4,12	4,19	4,26	4,33	4,41	4,48	4,55	4,62	4,69
70	4,76	4,83	4,90	4,98	5,05	5,12	5,20	5,27	5,34	5,41
80	5,48	5,56	5,63	5,70	5,78	5,85	5,92	5,99	6,07	6,14
90	6,21	6,29	6,36	6,43	6,51	6,58	6,65	6,73	6,80	6,87
100	6,95	7,03	7,10	7,17	7,25	7,32	7,40	7,47	7,54	7,62
110	7,69	7,77	7,84	7,91	7,99	8,06	8,13	8,21	8,28	8,35
120	8,43	8,50	8,58	8,65	8,73	8,80	8,88	8,95	9,03	9,10
130	9,18	9,25	9,33	9,40	9,48	9,55	9,63	9,70	9,78	9,85
140	9,93	10,00	10,08	10,16	10,23	10,31	10,38	10,46	10,54	10,61
150	10,69	10,77	10,85	10,92	11,00	11,08	11,15	11,23	11,31	11,38
160	11,46	11,54	11,62	11,69	11,77	11,85	11,93	12,00	12,08	12,16
170	12,24	12,32	12,40	12,48	12,55	12,63	12,71	12,79	12,87	12,95
180	13,03	13,11	13,19	13,27	13,36	13,44	13,52	13,60	13,68	13,76
190	13,84	13,92	14,00	14,08	14,16	14,25	14,34	14,42	14,50	14,58
200	14,66	14,74	14,82	14,90	14,98	15,06	15,14	15,22	15,30	15,38
210	15,48	15,56	15,64	15,72	15,80	15,89	15,97	16,05	16,13	16,21
220	16,30	16,38	16,46	16,54	16,62	16,70	16,79	16,86	16,95	17,03

Таблиця 2Д. Фізичні властивості сухого повітря ($p = 1,01 \cdot 10^5$ Па) [4]

$t, \text{ }^{\circ}\text{C}$	$\rho, \text{ кг/м}^3$	$c_p, \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$	$\lambda\cdot 10^2, \text{ Вт/(\text{м}\cdot\text{K)}$	$\alpha\cdot 10^6$	$\nu\cdot 10^6$	Pr
				$\text{м}^2/\text{с}$		
10	1,247	1,005	2,51	20,0	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,59	21,4	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,67	22,9	16,00	0,701
40	1,128	1,005	2,76	24,3	16,96	0,699

Таблиця 3Д. Температура кипіння води $t_n, ^\circ\text{C}$, у залежності від барометричного тиску p_b , мм рт. ст. [4]

p_b	t_n	p_b	t_n	p_b	t_n
690	97,3	730	98,9	770	100,4
700	97,7	740	99,3	780	100,7
710	98,1	750	99,6	790	101,1
720	98,5	760	100,0	800	101,4

Таблиця 4Д. Фізичні властивості води при атмосферному тиску ($p = 1,013 \cdot 10^5$ Па) [6]

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p, \text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	$\lambda \cdot 10^2, \text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\beta \cdot 10^4, \text{К}^{-1}$	$\sigma \cdot 10^4, \text{Н/м}$	Pr
10	999,7	4,191	57,4	1,306	+ 0,70	741,6	9,52
20	998,2	4,183	59,9	1,006	1,82	726,9	7,02
30	995,7	4,174	61,8	0,805	3,21	712,2	5,42
40	992,2	4,174	63,5	0,659	3,87	696,5	4,31
50	988,1	4,174	64,8	0,556	4,49	676,9	3,54
60	983,2	4,179	65,9	0,478	5,11	662,2	2,98
70	977,8	4,187	66,8	0,415	5,70	643,5	2,55
80	971,8	4,195	67,4	0,365	6,32	625,9	2,21
90	965,3	4,208	68,0	0,326	6,95	607,2	1,95
100	958,4	4,220	68,3	0,295	7,52	588,6	1,75

24 Таблиця 5Д. Фізичні властивості води на лінії насичення [4]

$t, \text{ }^{\circ}\text{C}$	$p \cdot 10^{-5},$ Па	$\rho',$ кг/м ³	$h',$ кДж/кг	$c_p,$ кДж/(кг·К)	$\lambda \cdot 10^2,$ Вт/(м·К)	$a \cdot 10^8,$ м ² /с	$\mu \cdot 10^6,$ Па·с	$\nu \cdot 10^6,$ м ² /с	$\beta \cdot 10^4,$ К ⁻¹	$\sigma \cdot 10^4,$ Н/м	Pr
100	1,013	958,4	419,1	4,220	68,3	16,9	282,5	0,295	7,52	588,6	1,75
110	1,430	951,0	461,4	4,233	68,5	17,0	259,0	0,272	8,08	569,0	1,60
120	1,980	943,1	503,7	4,250	68,6	17,1	237,4	0,252	8,64	548,4	1,47
130	2,700	934,8	546,4	4,266	68,6	17,2	217,8	0,233	9,19	528,8	1,36

Таблиця 6Д. Фізичні властивості водяної пари на лінії насичення [4]

$t, \text{ }^{\circ}\text{C}$	$p \cdot 10^{-5}$ Па	$\rho'',$ кг/м ³	h''		$c_p,$ кДж/кг·К	$\lambda \cdot 10^2,$ Вт/(м·К)	$a \cdot 10^8,$ м ² /с	$\mu \cdot 10^6,$ Па·с	$\nu \cdot 10^6,$ м ² /с	Pr
			κ Дж/кг							
100	1,01	0,598	2675,9	2256,8	2,135	2,372	18,58	11,97	20,02	1,08
110	1,43	0,826	2691,4	2230,0	2,177	2,489	13,83	12,46	15,07	1,09
120	1,98	1,121	2706,5	2202,8	2,206	2,593	10,50	12,85	11,46	1,09
130	2,70	1,496	2720,7	2174,3	2,257	2,686	7,972	13,24	8,85	1,11
140	3,61	1,966	2374,1	2145,0	2,315	2,791	6,130	13,54	6,89	1,12

Таблиця 7Д. Інтегральний ступінь чорноти матеріалів [2, 4]

Матеріал і характер поверхні	$t, ^\circ\text{C}$	ε
Алюміній:		
полірований	225...575	0,039...0,057
шорсткий	26	0,055
окислений при 600 °C	200...600	0,11...0,19
Сталь:		
окислена при 600 °C	200...600	0,79
окислена, шорстка	40...370	0,94...0,97
Латунь:		
полірована	245...355	0,028...0,031
окислена при 600 °C	200...600	0,61...0,59
Мідь:		
полірована	80...115	0,018...0,023
окислена при 600 °C	200...600	0,57...0,87
Червона цегла шорстка	20	0,93
Шамотна цегла глазурована	1100	0,75
Динасова цегла шорстка:		
неглазурована	1000	0,80
глазурована	1100	0,85
Сажа	40...370	0,95

ЗМІСТ

Передмова	3
Загальні вимоги до проведення робіт і оформлення звітів	3
1. СТАЦІОНАРНА ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ	4
<i>Лабораторна робота № 1. Визначення коефіцієнта тепло-</i> <i>провідності твердих тіл методом плоского шару</i>	4
2. НЕСТАЦІОНАРНА ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ	10
<i>Лабораторна робота № 2. Визначення коефіцієнтів темпе-</i> <i>ратуропровідності, теплопровідності та тепловіддачі методом</i> <i>регулярного режиму</i>	10
3. КОНВЕКТИВНИЙ ТЕПЛООБМІН	19
<i>Лабораторна робота № 3.1. Вивчення тепловіддачі верти-</i> <i>кальної пластини до вільного потоку повітря</i>	19
<i>Лабораторна робота № 3.2. Вивчення тепловіддачі верти-</i> <i>кального циліндра до вільного потоку повітря</i>	31
<i>Лабораторна робота № 3.3. Вивчення тепловіддачі гори-</i> <i>зонтального циліндра до вільного потоку повітря</i>	32
4. ТЕПЛООБМІН ПРИ ФАЗОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАННЯХ	35
<i>Лабораторна робота № 4. Дослідження тепловіддачі при</i> <i>конденсації водяної пари на поверхні горизонтальної труби</i>	35
5. ТЕПЛООБМІН ВИПРОМІНЮВАННЯМ	42
<i>Лабораторна робота № 5. Визначення інтегрального сту-</i> <i>пеня чорноти твердого тіла калориметричним методом</i>	42
Список використаної літератури	51
Додатки	52